



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки 12.03.01 «Приборостроение»
Отделение контроля и диагностики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Бесконтактные методы измерения расстояния в системах автоматического контроля

УДК 531.717.85:681.518.3.08

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б7Б	Морозова Алина Викторовна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ТПУ	Якимов Е.В.	к.т.н.		01.10.2020

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Жиронкин С. А.	д.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД	Авдеева И.И.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП 12.03.01 Приборостроение	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Мойзес Б.Б.	к.т.н., доцент		

Томск – 2021 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции СУОС	Наименование компетенции СУОС
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики
ОПК(У)-2	Способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-3	Способность выявлять естественно-научную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения физико-математический аппарат
ОПК(У)-4	Способность учитывать современные тенденции развития техники и технологий в своей профессиональной деятельности
ОПК(У)-5	Способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований
ОПК(У)-6	Способность собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по тематике исследования
ОПК(У)-7	Способность использовать современные программные средства подготовки конструкторско-технологической документации
ОПК(У)-8	Способность использовать нормативные документы в своей деятельности
ОПК(У)-9	Способность владеть методами информационных технологий, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
ОПК(У)-10	Готовность пользоваться основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-5	Способность к анализу, расчету, проектированию и конструированию в соответствии с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов на схемотехническом и элементном уровнях
ПК(У)-6	Способность к оценке технологичности и технологическому контролю простых и средней сложности конструкторских решений, разработке типовых процессов контроля параметров механических, оптических и оптико-электронных деталей и узлов
ПК(У)-7	Готовность к участию в монтаже, наладке настройке, юстировке, испытаниях, сдаче в эксплуатацию опытных образцов, сервисном обслуживании и ремонте техники
ПК(У)-8	Способность к расчету норм выработки, технологических нормативов на расход материалов, заготовок, инструмента, выбору типового оборудования, предварительной оценке экономической эффективности техпроцессов
ПК(У)-9	Способность к разработке технических заданий на конструирование отдельных узлов приспособлений, оснастки и специального инструмента, предусмотренных технологией
ПК(У)-10	Готовность к участию в работах по доводке и освоению техпроцессов в ходе технологической подготовки оптического производства
ПК(У)-11	Способность к организации входного контроля материалов и комплектующих изделий
ПК(У)-12	Готовность к внедрению технологических процессов производства, метрологического обеспечения и контроля качества элементов приборов различного назначения

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки 12.03.01 «Приборостроение»
Отделение контроля и диагностики

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Б.Б. Мойзес

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
1Б7Б	Морозова Алина Викторовна

Тема работы:

Бесконтактные методы измерения расстояния в системах автоматического контроля	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	Приказ №12-44/с от 12.01.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Целью работы является исследование методов построения бесконтактных датчиков расстояния для системы контроля соосности сварных соединений бурильных труб. 1. Произвести обзор методов построения бесконтактных датчиков расстояния с пределами измерения в интервале от 10 до 50 мм и разрешением не более 10 мкм.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Литературный обзор методов построения бесконтактных датчиков расстояния. 2. Обзор промышленно выпускаемых датчиков расстояния с указанием основных характеристик и стоимости.
Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант

«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Жиронкин Сергей Александрович, профессор ОСГН	
«Социальная ответственность»	Авдеева Ирина Ивановна, старший преподаватель ООД	
Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику		05.10.2020

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ТПУ	Якимов Е.В.	к.т.н.		05.10.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б7Б	Морозова Алина Викторовна		05.10.2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 12.03.01 «Приборостроение»
 Уровень образования бакалавриат
 Отделение контроля и диагностики
 Период выполнения весенний семестр 2020/2021 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	1.06.2021 г.
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
29.11.2020	Обзор источников информации	20
29.11.2020	Формулирование целей и задач работы, формулирование предмета и объекта разработки	5
11.03.2021	Проведение инженерных расчетов, сбор информации	20
11.05.2021	Разработка метода оценки фирм-производителей датчиков	20
29.05.2021	Анализ полученных результатов и выводы о достижении цели в основном разделе ВКР	5
29.05.2021 г.	Разработка разделов «Социальная ответственность» и «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	10
05.06.2021 г.	Оформление ВКР и презентационных материалов	20

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ТПУ	Якимов Е.В.	к.т.н.		01.10.2020

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП 12.03.01 «Приборостроение»	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мойзес Б.Б.	к.т.н., доцент		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1Б7Б	Морозова Алина Викторовна

Школа	ИШНКБ	Отделение школы (НОЦ)	ОКД
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	12.03.01 Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, которая находится в российских и иностранных научных публикациях, статистических бюллетенях и изданиях
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Нормативно-правовые документы; Методические указания по разработке раздела
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Налоговый кодекс РФ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Анализ потенциальных потребителей результатов исследования; Определение целевого рынка; Выполнение SWOT-анализа
2. Разработка устава научно-технического проекта	Точное формулирование проблемы исследования; Выбор наиболее желательных функциональных решений
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Определение структуры проекта и установление продолжительности работ; Составление календарного плана проекта; Определение бюджета НТИ
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Проведение оценки экономической эффективности НТИ

Перечень графического материала(с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ;
2. Сегментирование рынка;
3. Оценка конкурентоспособности технических решений;
4. Матрица SWOT;
5. График проведения и бюджет НТИ;
6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ;
7. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Жиронкин С.А.	д-р экон. наук		27.02.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б7Б	Морозова Алина Викторовна		27.02.2021

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1Б7Б	Морозова Алина Викторовна

Школа	ИШНКБ	Отделение (НОЦ)	ОКД
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	12.03.01 Приборостроение

Тема ВКР:

Бесконтактные методы измерения расстояния в системах автоматического контроля	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования – производители приборов бесконтактного контроля расстояния.</p> <p>Рабочая зона – учебная аудитория. Исследование включает в себя работу с компьютером. Площадь отапливаемого помещения 20 м², освещение смешанное, наличие ПК и рабочего стола.</p> <p>Области применения – системы контроля соосности сварных соединений бурильных труб.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<p>Правовое обеспечение и организационные мероприятия согласно ГОСТ 12.4.299-2015 и ТК РФ от 30.12.2001 N197-ФЗ</p> <p>Законодательные и нормативные документы по теме:</p> <p>ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ</p> <p>ГОСТ 21752-76</p> <p>ГОСТ 21889-76</p> <p>ГОСТ 22269-76</p> <p>ГОСТ 22614-77</p> <p>ГОСТ Р 50923-96</p> <p>ГОСТ Р ИСО 9241-4-2009</p> <p>ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ</p> <p>ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ</p> <p>ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ</p> <p>ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ</p> <p>ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ</p> <p>ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ</p> <p>Р 2.2.2006-05</p> <p>СанПиН 2.2.4.548-96</p> <p>СН 2.2.4/2.1.8.562-96</p> <p>СН 2.2.4/2.1.8.566-96</p> <p>СП 60.13330.2016</p> <p>СП 52.13330.2016</p> <p>СанПиН 1.2.3685-21</p> <p>Федеральный закон № 426-ФЗ от 28.12.2013 г.</p> <p>Федеральный закон № 421-ФЗ от 28.12.2013 г.</p> <p>Федеральный закон № 123-ФЗ от 22.07.2008 г.</p> <p>Конституция Российской Федерации</p>
2. Производственная безопасность:	<p>Выявить вредные факторы в учебной аудитории: освещенность, шум, микроклимат;</p> <p>Рассмотреть:</p>

	<p>1) требования к технике безопасности при работе за компьютером;</p> <p>2) влияние психофизиологических факторов: монотонность труда, эмоциональные перегрузки, умственное перенапряжение;</p> <p>Выявить опасные факторы, относящиеся к оборудованию: электрический ток, короткое замыкание, статическое электричество.</p>
3. Экологическая безопасность:	<p>Рассмотреть:</p> <p>Вопрос утилизации люминесцентных ламп, макулатуры, микросхем оборудования и периферийных устройств.</p>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<p>Определить перечень наиболее возможных ЧС: пожар, взрыв, разрушение зданий в результате разрядов атмосферного электричества, ураган.</p> <p>Наиболее актуальная ЧС – возникновение пожара;</p> <p>Рассмотреть профилактические мероприятия, требования к безопасности и меры по ликвидации её последствий:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Использование огнетушителя, песка, асбестового одеяла, пожарного крана и пожарного щита; 2. Обеспечение средствами индивидуальной защиты; 3. Организационная эвакуация работников.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2021
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Авдеева Ирина Ивановна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б7Б	Морозова Алина Викторовна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 103 с., 20 рис., 94 таблицы, 70 источников.

Ключевые слова: контроль соосности, сварные соединения бурильных труб, бесконтактные датчики, индуктивные бесконтактные датчики, емкостные бесконтактные датчики, вихретоковые бесконтактные датчики, ультразвуковые бесконтактные датчики, оптические бесконтактные датчики, триангуляционные бесконтактные датчики, радарные бесконтактные датчики.

Объектом исследования являются приборы бесконтактного контроля расстояния.

Цель работы – анализ методов и средств бесконтактного контроля расстояния в системах автоматического контроля.

В процессе исследования были изучены методы и приборы средств бесконтактного контроля расстояния и их физические основы.

В результате исследования был получен анализ доступных бесконтактных датчиков расстояния на российском рынке.

Степень внедрения: лабораторные исследования.

Область применения: контроль соосности сварных соединений бурильных труб.

Экономическая эффективность/значимость работы: стадия научного исследования.

В будущем планируется на основе исследуемого проекта разработать бесконтактный прибор контроля расстояния, не уступающего по характеристикам имеющимся аналогам.

Оглавление

Введение.....	13
1. Методы контроля расстояния.....	14
1.1. Контактный метод измерения расстояния.....	14
1.2. Бесконтактный метод измерения расстояния.....	14
2. Основные типы бесконтактных датчиков.....	15
2.1. Физические основы бесконтактного метода контроля расстояния.....	15
2.2. Индуктивные бесконтактные датчики расстояния.....	16
2.2.1. Физические основы индуктивных датчиков расстояния.....	16
2.2.2. Основные характеристики и особенности индуктивных датчиков приближения.....	19
2.2.3. Влияние материала и размеров объекта обнаружения на параметры.....	19
2.2.4. Существующие фирмы-производители датчиков индуктивности.....	21
2.3. Емкостные бесконтактные датчики расстояния.....	28
2.3.1. Физические основы емкостных бесконтактных датчиков расстояния.....	28
2.3.2. Основные характеристики и особенности емкостных датчиков приближения.....	30
2.3.3. Обзор серий фирм-производителей.....	32
2.4. Вихретоковые датчики положения и перемещения объектов.....	37
2.4.1. Физические основы вихретоковых датчиков положения и перемещения объектов.....	37
2.4.2. Конструкция вихретоковых датчиков положения и перемещения объектов.....	39
2.4.3. Зависимость погрешности от магнитных свойств контролируемого объекта.....	40
2.4.4. Обзор серий фирм-производителей.....	40
2.5. Ультразвуковые датчики положения и перемещения объектов.....	44

2.5.1. Физические основы ультразвуковых датчиков положения и перемещения объектов.....	44
2.5.2. Обзор серий фирм-производителей.....	45
2.6. Оптические бесконтактные датчики расстояния.....	48
2.6.1. Физические основы оптических бесконтактных датчиков расстояния.....	48
2.6.2. Триангуляционный принцип измерения расстояния до объекта лазерным датчиком.....	49
2.6.2.1. Физические основы триангуляционного датчика измерения расстояния до объекта.....	49
2.6.2.2. Сравнение серий оптических датчиков.....	50
2.7. Радарные бесконтактные датчики расстояний.....	59
2.7.1. Физические основы радарных бесконтактных датчиков расстояний.....	59
2.7.2. Сравнение серий радарных датчиков.....	59
2.8. Результат проведенного исследования.....	61
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение....	64
3.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	64
3.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	64
3.1.2. Анализ конкурентных технических решений.....	64
3.1.3. SWOT – анализ.....	65
3.2. Планирование научно-исследовательских работ.....	68
3.2.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	68
3.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ.....	69
3.2.3. Разработка графика проведения научного исследования.....	70
3.3. Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	72
3.3.1. Расчет материальных затрат.....	72
3.3.2. Расчет затрат на специальное оборудование.....	72

3.3.3. Основная заработная плата исполнителей темы.....	73
3.3.4. Дополнительная заработная плата.....	75
3.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые взносы).....	75
3.3.6. Накладные расходы.....	76
3.3.7. Формирование бюджета затрат научно-технического исследования.....	76
3.4.Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	77
4. Социальная ответственность.....	81
4.1.Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности....	81
4.2.Производственная безопасность.....	83
4.2.1. Зрительное напряжение.....	83
4.2.2. Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении.....	84
4.2.3. Недостаточная освещенность.....	85
4.2.4. Нервно-психические перегрузки.....	86
4.2.5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.....	86
4.2.6. Шум.....	88
4.3.Экологическая безопасность.....	88
4.4.Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	90
4.5.Выводы по разделу.....	92
Заключение.....	93
Список использованных источников литературы.....	94

Введение

В данной бакалаврской работе рассматриваются фирмы -производители бесконтактных датчиков измерения расстояния в системах автоматического контроля. По результатам исследования получим анализ существующих датчиков для измерения расстояния. Проведем сравнение между фирменными датчиками, чтобы найти более выгодный вариант.

Бесконтактные датчики расстояния будут применяться для контроля соосности сварных соединений бурильных труб.

Результаты исследования будут актуальны для производителей бурильных труб, так как контроль за соосностью сварных соединений бурильных труб напрямую влияет на качество последних.

1 Методы контроля расстояния

1.1 Контактный метод измерения расстояния

Так как в дипломной работе будут рассматриваться примеры только бесконтактных датчиков, подробно на контактных датчиках останавливаться мы не будем.

В основе контактного метода измерения лежит принцип контакта чувствительного элемента с объектом измерения, в результате чего на выходе датчика появляется информация.

Широко распространенные контактные датчики это концевые выключатели (к примеру, датчики закрытия дверей в автомобилях).

Контактные датчики выполняют также не только функцию включения / выключения, которая может определить наличие перед датчиком объекта, но и дать информацию о точном расположении объекта посредством чувствительного элемента. Для примера возьмем резистивные датчики уровня топлива: для них сопротивление, пропорциональное уровню жидкости – аналоговый выходной сигнал.

Достоинства контактных датчиков: простота устройства и использования.

Недостатки контактных датчиков: в их конструкциях используются механические подвижные части; в большинстве случаев невозможно создать высокий уровень пыле- и влаго- защищенности, из-за чего сокращается срок службы.

От этих недостатков избавлены бесконтактные датчики, которые, по сравнению с контактными датчиками, имеют более длительный срок пользования, а также защиту от негативного воздействия внешней среды.

1.2 Бесконтактный метод измерения расстояния

В основе бесконтактного метода измерений лежит принцип бесконтактного контроля расстояний, то есть чувствительный элемент прибора не контактирует с объектом измерения.

Для исследовательской работы был выбран бесконтактный метод измерения расстояния, потому что датчики, работающие по этому принципу, более долговечны, а также могут измерять расстояние в труднодоступных местах.

2 Основные типы бесконтактных датчиков

2.1 Физические основы бесконтактного метода контроля расстояния

Первые бесконтактные датчики расстояния были разработаны для задач определения объекта перед чувствительным элементом: они показывали в дискретном виде есть перед ним предмет или нет. Для того, чтобы определить расстояние от прибора до объекта необходимы были более сложные датчики.

Для решения задач автоматизации технологических процессов были разработаны датчики, с разной точностью определяющие расстояние до объекта и его положение с помощью аналогового сигнала на выходе, который пропорционален расстоянию до измеряемого объекта.

Бесконтактные датчики могут применяться в следующих сферах:

- измерение профиля изделия;
- определение расстояния до объекта;
- измерение толщины объекта;
- измерение наклона и деформации;
- центровка;
- измерение диаметра;
- и др.

В данной исследовательской работе будут рассматриваться следующие методы измерений: индуктивный, емкостной, вихретоковый, ультразвуковой и оптический. Выходным сигналом для этих методов является электрический сигнал, пропорциональный расстоянию до измеряемого объекта.

Типы бесконтактных датчиков:

- 1) Индуктивные датчики расстояния;
- 2) Емкостные датчики расстояния;
- 3) Вихретоковые датчики расстояния;

- 4) Ультразвуковые датчики расстояния;
- 5) Оптические датчики расстояния (триангуляционные);
- 6) Радарные датчики расстояния.

2.2 Индуктивные бесконтактные датчики расстояния

2.2.1 Физические основы индуктивных датчиков расстояния

Индуктивный датчик - это преобразователь параметрического типа, принцип действия которого основан на изменении индуктивности L или взаимоиндуктивности обмотки с сердечником, вследствие изменения магнитного сопротивления R_M магнитной цепи датчика, в которую входит сердечник.

Индуктивные датчики определяют расстояние только до проводящих металлических объектов: сталь, алюминий, латунь и др.

По техническому заданию для ВКР датчики должны измерять расстояние до бурильных труб. Бурильные трубы изготавливаются в основном из стали, но, когда необходимо облегчить конструкцию, могут применяться металлы с легким удельным весом, например, сплавы алюминия.

Принцип работы индуктивных датчиков основан на определении токов взаимной индукции и явлении самоиндукции. Такие датчики очень устойчивы к воздействию неметаллических предметов и помех. Например, пыль или машинное масло не внесут коррективов в работу датчика. Современные индуктивные датчики имеют диаметр всего 6 мм и измеряемое расстояние 2 мм. Благодаря высокому разрешению и быстрому времени отклика такие датчики используют в большинстве высокоскоростных задач.

Достоинства:

- точность;
- время отклика;
- разрешение.

Из недостатков индуктивных датчиков нужно выделить их нелинейность, которая представляет проблему с погрешностью. Нелинейность равняется 3% - 5%, которая может быть снижена путем представления выходного сигнала

полиномной функцией, с помощью которой затем программируются контроллеры и создаются алгоритмы измерения.

Для устранения нелинейности датчик интегрируется микропроцессором, который производит линеаризацию выходной характеристики датчика. Таким способом достигается нелинейность порядка 0,4%.

Рабочая зона индуктивных датчиков перемещения (рис. 2.2.1) существенно ограничивается размером самого датчика. Для материала объектов контроля такого датчика подходят только ферромагнитные материалы. Когда ферромагнитный объект контроля находится в окрестностях датчика, изменяется его магнитное поле, а вслед меняется индуктивность катушки [3].

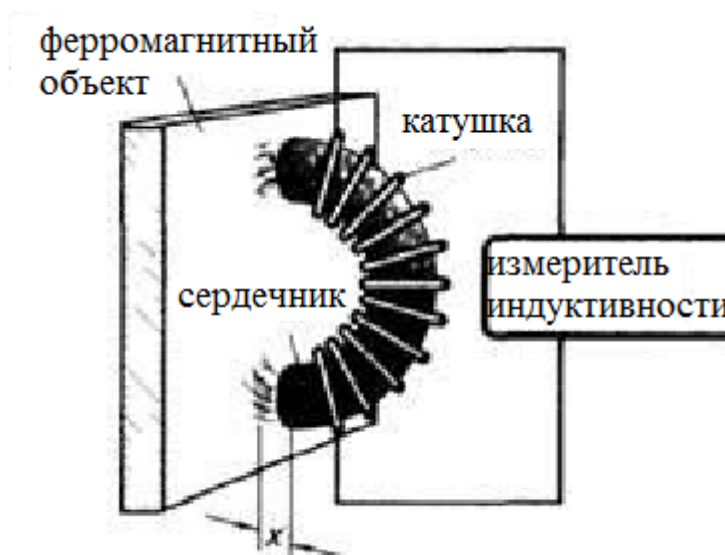


Рисунок 2.2.1 – Поперечный индуктивный датчик приближения

Основной элемент индуктивного датчика – катушка индуктивности (рис. 2.2.2). Катушка подключена к генератору, на ее выводах переменное электрическое напряжение вызывает переменное магнитное поле. Линии поля перпендикулярны направлению тока в витках катушки.

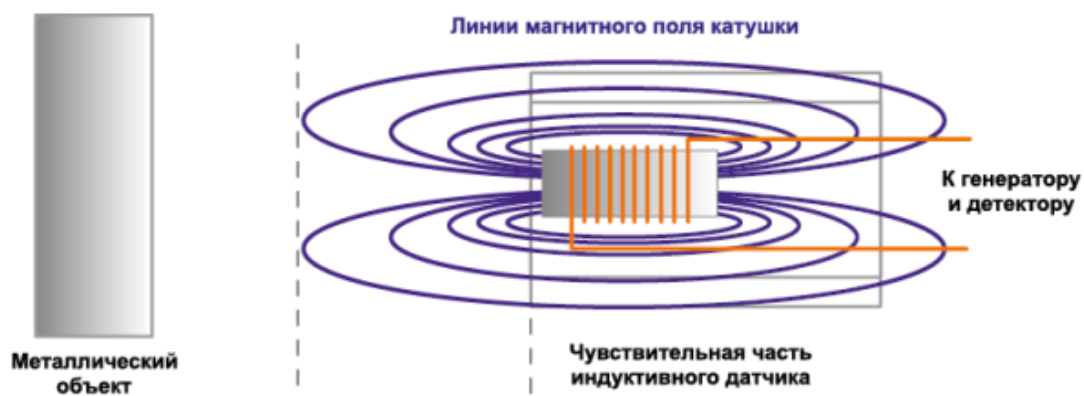


Рисунок 2.2.2 – Принцип работы индуктивного датчика приближения

Диаграмма работы индуктивного датчика:

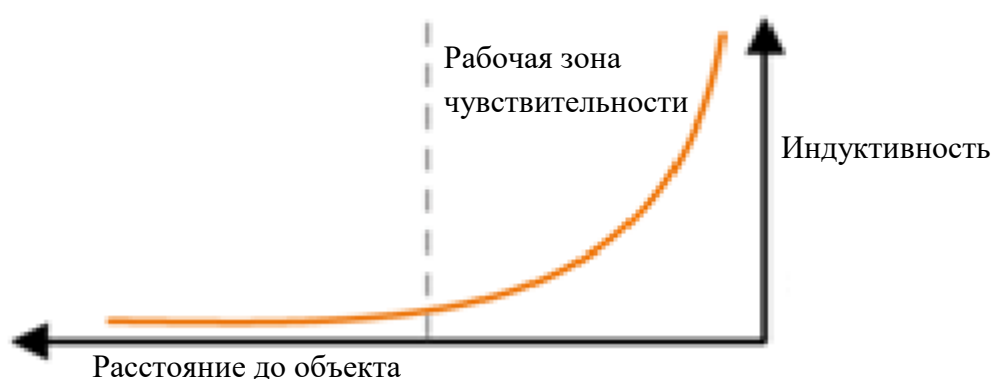


Рисунок 2.2.3 – Диаграмма срабатывания датчика индуктивности

Если вблизи катушки нет объекта контроля, линии магнитного поля замыкаются по воздуху. Амплитуда электрических колебаний при этом максимальна.

При приближении к катушке объекта ее индуктивность увеличивается, а амплитуда электрических колебаний уменьшается. Это происходит, потому что с уменьшением расстояния до объекта увеличивается количество силовых линий, замыкающихся через металлический объект. Увеличение индуктивности приводит к уменьшению частоты.

Амплитуда является основным параметром, по которому детектор индуктивного датчика судит о расстоянии до металлического объекта.

Недостаток: такие датчики работают только с объектами из ферромагнитных материалов [3].

Расстояние срабатывания индуктивного датчика зависит от формы и размеров объекта, а также от материала объекта. Структурная схема индуктивного датчика:



Рисунок 2.2.4 – Структурная схема индуктивного датчика

2.2.2 Основные характеристики и особенности индуктивных датчиков приближения

Зона чувствительности или активная зона (Sensing Distance), мм. Определяется размерами датчика. Изменение индуктивности происходит вблизи чувствительного элемента сенсора (рисунки 2.2.2, 2.2.3).

Расстояние, на котором датчик реагирует на объект сравним с размером измерительного датчика. Зона, в которой чувствительный элемент регистрирует перемещение объекта называется активной зоной, она определяет область наибольшей плотности линий магнитного поля.

Расстояние срабатывания, мм. Задается внутренним триггером с гистерезисом, который исключает ложные срабатывания.

Рабочий зазор (Setting Distance), мм – расстояние, на котором гарантированно обнаруживается заданный объект.

Материал и размер объекта, температурный дрейф, технологические параметры датчика: всё это влияет на величину вышеуказанных параметров. Поэтому для точных измерений все приведенные характеристики измеряются при использовании конкретного объекта при нормальной температуре (обычно 20 или 25°C).

2.2.3 Влияние материала и размеров объекта обнаружения на параметры

Материал и форма контролируемого объекта оказывают влияние на итоговую индуктивность, так как сам объект в данном случае представляет собой

сердечник для катушки. Номинальные характеристики индуктивных датчиков применимы только к конкретному объекту, который всегда указывается в документации на датчик. Обычно это железная квадратная пластина с указанными размерами.

При использовании другого материала, нужно использовать поправочный коэффициент редукции (таблица 2.2.1).

Таблица 2.2.1 - Примеры коэффициентов редукции индуктивных датчиков

Материал	Коэффициент
Сталь	1
Чугун	0,93...1,05
Никель	0,65...0,75
Нержавеющая сталь	0,60...1,00
Алюминий	0,30...0,45
Латунь	0,35...0,50
Медь	0,25...0,45

Можно выделить следующие погрешности индуктивного датчика:

Обязательно подлежат оценке при разработке датчика:

1. Погрешность от нелинейности характеристики;
2. Температурная погрешность;

Погрешности, которые могут не учитываться:

3. Погрешность от влияния внешних электромагнитных полей;
4. Погрешность от магнитоупругого эффекта;
5. Погрешность от тензометрического эффекта обмотки;
6. Погрешность от соединительного кабеля;
7. Конструктивные погрешности;
8. Технологические погрешности;
9. Погрешность от старения датчика.

Индуктивные датчики могут измерять расстояние до объектов из стали и цветных металлов без коэффициента редукции (с одинаковым расстоянием срабатывания). Из плюсов индуктивных датчиков можно выделить также защиту от электромагнитных полей, создаваемых расположенными рядом с ними проводников с силой тока до 25кА. Это преимущество помогает в условиях сварочных работ. Чтобы дополнительно защитить датчики от сварочных брызг, корпуса покрываются тефлоном. Датчики изготавливают как в прямоугольном корпусе, так и в стандартных цилиндрических, резьбовых.

Индуктивные датчики производят в цилиндрических и в удлиненных прямоугольных корпусах, на расстояния срабатывания до 50 мм [10].

2.2.4 Существующие фирмы-производители датчиков индуктивности

Приведем к рассмотрению характеристики наиболее распространенных серий бесконтактных индуктивных датчиков:

1) Серия LM

Производитель: «Delta-Kip»

Технические характеристики:

- Ток: 200мА;
- При срабатывании датчика загорается индикатор;
- Рабочая температура окружающей среды: -25°C - +70°C;
- Класс защиты: IP67.

Таблица 2.2.2 – Параметры индуктивных датчиков серии LM [11]

Наименование	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Размеры стандартного объекта воздействия, мм
LM8-3001NA-L	6 - 36	1	500	8мм x 8мм x 1 мм
LM12-33008NA-L	10 - 30	8	1000	12мм x 12мм x 1 мм
LM18-33008NA-L		8	1000	18мм x 18мм x 1 мм
LM18-33016NA-L		16	1000	18мм x 18мм x 1 мм
LM30-33025NA-L		25	100	30мм x 30мм x 1 мм

LMF3-3005NA	6 - 36	5	400	20мм x 20мм x 1 мм
LMF6-3008NA		8	200	30мм x 30мм x 1 мм

Средняя цена одного датчика серии LM – 600 – 1900 руб в зависимости от курса доллара и расстояния срабатывания.

2) Серия RM

Производитель: фирма "WayCon Positionsmesstechnik GmbH", Германия.

Таблица 2.2.3 – Параметры индуктивных датчиков серии RM [12]

Диапазон измерений	Напряжение питания, В	Линейность, %	Максимальная частота, Гц	Температурный коэффициент
0..2	3 В	0,30 (0,20 опционально)	55	-0,0055, ±0,002 %/К
0..5			50	
0..10				
0..25			35	
0..50				
0..100			20	
0..200				

3) Серия RL

Производитель: фирма "WayCon Positionsmesstechnik GmbH", Германия.

Таблица 2.2.4 – Параметры индуктивных датчиков серии RL [13]

Наименование	Диапазон измерений	Напряжение питания, В	Линейность, %	Температурный коэффициент
RL10	0..10	3 В	0,30 (0,20 опционально)	-0,0055, ±0,002 %/К
RL25	0..25			
RL50	0..50			
RL80	0..80			
RL100	0..100			
RL150	0..150			
RL200	0..200			
RL300	0..300			
RL400	0..400			
RL500	0..500			
RL600	0..600			
			1,50	

4) Серия LA

Производитель: KIPPRIBOR.

Таблица 2.2.5 – Параметры индуктивных датчиков серии LA [14]

Диаметр	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Температурная погрешность
M08	10...30 VDC	1/2	500/300	≤ 10 % полной шкалы
M12	10...30 VDC; 10...60 VDC;	2; 4;	2 кГц/25; 1 кГц/25;	
M18	10...30 VDC; 10...60 VDC;	5; 8;	1 кГц/25; 500/25;	
M30	10...30 VDC; 10...60 VDC;	10; 15;	300/25; 150/25;	

5) Серия LK

Производитель: KIPPRIBOR, Россия.

Таблица 2.2.6 – Параметры индуктивных датчиков серии LK [15]

Ширина корпуса, мм	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Точность повторения, %
8	10...30 VDC	1/2	500/300	≤ 1 полной шкалы
10	10...30 VDC; 10...60 VDC;	2; 4;	2 кГц/25; 1 кГц/25;	
18	10...30 VDC; 10...60 VDC;	5; 8;	1 кГц/25; 500/25;	

6) Серия E57PS

Производитель: немецкая компания Eaton Moeller.

Таблица 2.2.7 – Параметры индуктивных датчиков серии E57PS [16]

Диаметр, мм	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Точность повторения, %
12	10...48 VDC	2/4	2000	≤ 1 полной шкалы
18	10...48 VDC	5/8	1200	
30	10...48 VDC	10/15	600	

7) Серия E2A

Производитель: OMRON Corporation — крупная японская корпорация.

Таблица 2.2.8 – Параметры индуктивных датчиков серии E2A [17]

Диаметр, мм	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Погрешность, %
8	12-24 VDC	2/4	1500	10
12		4/8	1000	
18		8/16	500	

30		15/20	250	
----	--	-------	-----	--

8) Серия E2B

Производитель: OMRON Corporation — крупная японская корпорация.

Таблица 2.2.9 – Параметры индуктивных датчиков серии E2B [18]

Диаметр, мм	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Погрешность, %
8	10..30 VDC	1.5/2/4	50/60	10
12		2/4/5/8		
18		5/8/10/16		
30		10/15/20/30		

9) Серия E2E

Производитель: OMRON Corporation — крупная японская корпорация.

Таблица 2.2.10 – Параметры индуктивных датчиков серии E2E [19]

Диаметр, мм	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Погрешность, %
8	10..30 VDC	2	500	1
12		4		
18		8		
30		15/30		

10) Серия E2E NEXT

Производитель: OMRON Corporation — крупная японская корпорация.

Таблица 2.2.11 – Параметры индуктивных датчиков серии E2E [19]

Диаметр, мм	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Погрешность, %
8	10..30 VDC	4	500	1
12		9		
18		14		
30		23/50		

11) Серия E2E2

Производитель: OMRON Corporation — крупная японская корпорация.

Таблица 2.3.12 – Параметры индуктивных датчиков серии E2E2 [20]

Диаметр, мм	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Погрешность, %
8	10..30 VDC	1/2	500/300	1
12		2; 4;	2к/25к; 1к/25к	
18		5; 8;	1к/25к; 500/25;	
30		10; 15;	300/25; 150/25	

12) Серия E2EW

Производитель: OMRON Corporation — крупная японская корпорация.

Таблица 2.2.13 – Параметры индуктивных датчиков серии E2EW [21]

Диаметр, мм	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Погрешность, %
12	10..30 VDC	3	100	10
18		12	80	
30		22	40	

13) Серия E57P

Производитель: OMRON Corporation — крупная японская корпорация.

Таблица 2.2.14 – Параметры индуктивных датчиков серии E57P [22]

Диаметр, мм	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Погрешность, %
12	10..48 VDC	2/4/8	55	1
18		5/8/12		
30		10/15/22		

14) Серия ICB

Производитель: Компания Carlo Gavazzi, Швейцария.

Таблица 2.2.15 – Параметры индуктивных датчиков серии ICB [23]

Диаметр, мм	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Погрешность, %
12	10..36 VDC	2/4/8	2к	10
18		5/8/12	1,5к	
30		10/15/22	1к	

15) Серия PR/PRL

Производитель: Autonics (Ю. Корея).

Таблица 2.2.16 – Параметры индуктивных датчиков серии PR/PRL [24]

Наименование	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Погрешность, %
PR08/PR L08	15..30 VDC	1.5/2	800	10
PR12/PR L12		2/4	400	
PR18/PR L18		5/8	350	
PR30/PR L30		10/15	250	
PR12		2/4	20	
PR18		5/8		
PR30		10/15		

16) Серия PRT

Производитель: Autonics (Ю.Корея).

Таблица 2.2.17 – Параметры индуктивных датчиков серии PRT [24]

Наименование	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Погрешность, %
PRT08	15..30 VDC	1.5/2	800	10
PRT12		2/4	400	
PRT18		5/8	350	
PRT30		10/15	250	

17) Серия ISAN [30]

Производитель: НПК «ТЕКО» Челябинск.

Таблица 2.2.18 – Параметры индуктивных датчиков серии ISAN

Наименование	Рабочий зазор S _{раб}	Линейная зона рабочего зазора	Диапазон рабочих напряжений, U _{раб.}
ISAN E8A-31P-15-P, ISAN E8A-32P-15-P, ISAN E8A-43P-15-P	3...15 мм	4,5...12 мм	15...30 В DC
ISAN EC8A-31P-15-PS4, ISAN EC8A-32P-15-PS4, ISAN EC8A-43P-15-PS4	3...15 мм	4,5...12 мм	
ISAN I131P-31P-25-P, ISAN I131P-32P-25-P, ISAN I131P-43P-25-P	4...25 мм	6...22 мм	
ISAN I131P-31P-30-P, ISAN I131P-32P-30-P, ISAN I131P-43P-30-P	5...30 мм	6...25 мм	

ISAN IC131P-31P-25-PS4, ISAN IC131P-32P-25-PS4, ISAN IC131P-43P-25-PS4	4...25 мм	6...22 мм	
ISAN IC131P-31P-30-PS4, ISAN IC131P-32P-30-PS4, ISAN IC131P-43P-30-PS4	5...30 мм	6...25 мм	

18) Сравнение серий

Таблица 2.2.19 – Параметры датчиков индуктивности разных серий

Наименование серии	Линейность, %	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Погрешность при максимальном значении расстояния срабатывания	Разрешение	Цена, т.р.
LM	±0.1	1/5/8/16/25	≤ 0.25 мм	10/100 мкм	2
RM	±0,1	2...200	≤ 2 мм	80 мкм	19
RL		25..600	≤ 12 мм	240 мкм	15
LA	±0.1	1..15	≤ 0,15 мм	10 мкм	2
LK		2..12	≤ 0,12 мм		1
E57PS	±2	12..30	≤ 0,3 мм	10 мкм	22-25
E2A	±0.1	8..30	≤ 0,6 мм	1 мкм	24
E2B	-	1.5..30	≤ 0,9 мм		25
E2E	±0.1	4..23	≤ 0,23 мм		25
E2E NEXT		3..50	≤ 0,5 мм		40
E2E2		2..20	≤ 2 мм	10 мкм	23
E2EW		2..22	≤ 2,2 мм	10 мкм	24
E57P	±2	2..22	≤ 4,4 мм	100 мкм	20
ICB		0.8..40	≤ 2 мм	10 мкм	11
PR/PRL		1.5..15	≤ 0,15 мм	100 мкм	5
PRT		1.5..15	≤ 0,15 мм	100 мкм	5
ISAN	≤±3/±5	5..30	≤ 1,5 мм	10 мкм	9

Для наших целей выделим несколько лучших серий: LA, LK, E2E NEXT, ICB и ISAN. Датчики LA, LK и ISAN были выделены среди других благодаря своей стоимости: первые два выставлены на сайте продавца за 2 т.р., последний за 9 т.р. соответственно. Датчики имеют хороший диапазон работы, соответствующий техническому заданию. максимальное расстояние срабатывания среди этих серий – 30 мм для ISAN. Серии LA и LK имеют лучшую линейность, у ISAN наихудшая линейность среди всех серий, представленных в работе.

Датчик, способный работать на расстоянии 50 мм - E2E NEXT. Он имеет хорошую линейность, как у LA и LK: $\pm 0,1 \%$, но дороже остальных датчиков: почти 40 т.р.

Серии датчиков, в итоге признанные лучшими среди остальных серий: LA, LK, E2E NEXT, ICB.

2.3 Емкостные бесконтактные датчики расстояния

2.3.1 Физические основы емкостных бесконтактных датчиков расстояния

Минус индуктивных датчиков, заключенный в детектировании только электропроводящих материалов, полностью исключается емкостными датчиками. Контролировать расстояние такими датчиками можно до любых предметов, диэлектрическая проницаемость которых отлична от воздуха (дерево, металл, пластик и т.д.).

Принцип работы: емкостной датчик представляет собой две развернутые обкладки, создающие электрическое поле. В качестве диэлектрика выступает преимущественно воздух с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1$, поэтому при отсутствии объекта контроля вблизи чувствительного элемента емкость конденсатора мала. При приближении к обкладкам объекта контроля, линии электрического поля замыкаются через него и повышают емкость на выходе датчика. На изменение емкости влияет разница в диэлектрической проницаемости объекта и воздуха (рис. 2.3.1).

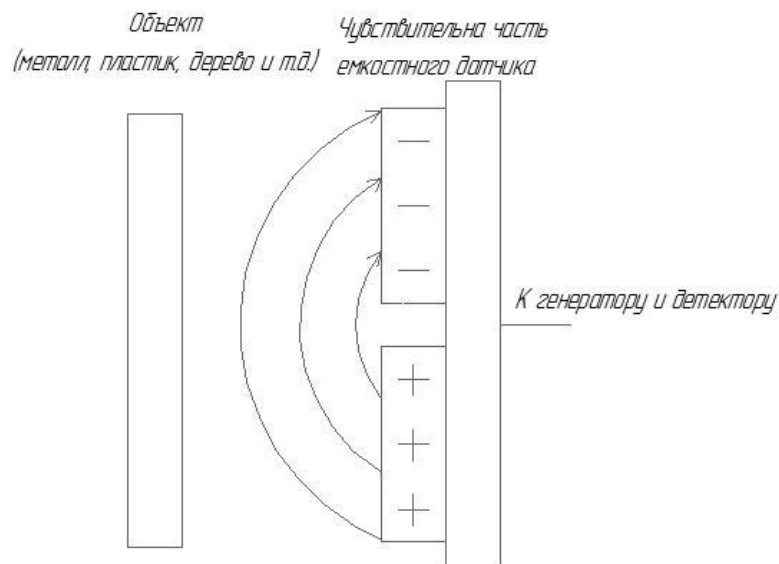


Рисунок 2.3.1 – Принцип работы емкостного датчика приближения

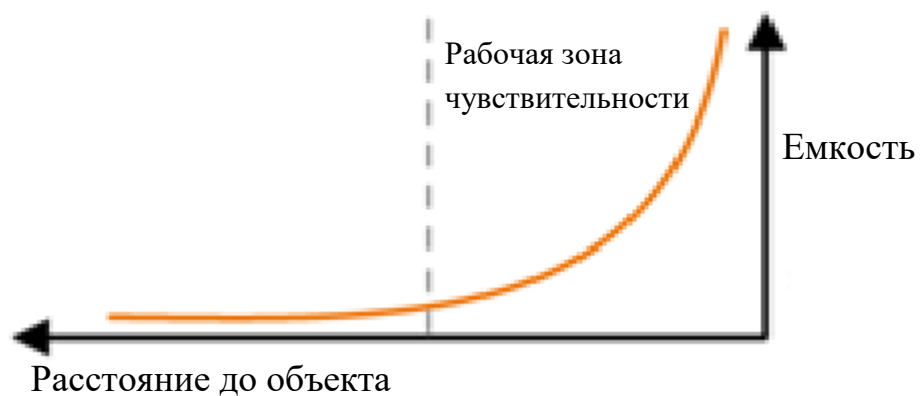


Рисунок 2.3.2 – Диаграмма срабатывания емкостного датчика

Ёмкость – основной параметр емкостных датчиков при контроле расстояний. Её изменение говорит о расположении объекта перед обкладками: с повышением объект приближается, с уменьшением – удаляется.

Обычно для измерения используются схемы с преобразованием емкости в частоту или амплитуду колебаний, которые измеряются с помощью детектора. В итоге, как и для индуктивного датчика, необходимо наличие генератора и детектора (рис. 2.3.3).



Рисунок 2.3.3 – Структурная схема датчика приближения

2.3.2 Основные характеристики и особенности емкостных датчиков приближения

- 1) Зона чувствительности или активная зона (*Sensing Distance*), мм;
- 2) Расстояние срабатывания;
- 3) Рабочий зазор (*Setting Distance*), мм: на данный параметр влияют все характеристики, которые оказывают влияние на индуктивные датчики;

Влияние материала и размеров объекта обнаружения на параметры

Итоговая ёмкость конденсатора, полученная на выходе датчика, зависит от формы и материала объекта. Максимальная чувствительность у датчика наблюдается для материалов с большой диэлектрической проницаемостью (таблица 2.3.1.1).

Таблица 2.3.1 – Значения диэлектрической проницаемости для различных материалов

Материал	Диэлектрическая проницаемость
Воздух	1
Полиэтилен	1...2
Дерево	6...8
Стекло	5...10
Вода	80...81

Чтобы исключить возникновение большой погрешности итогового результата ёмкости, следует тщательно следить за объектом контроля: на нем не

должен скапливаться конденсат или быть слой масла. Любое, даже незначительное загрязнение поверхности, искажает результат измерения.

При снятии результатов ёмкости следует принимать во внимание размеры объекта контроля. Ёмкость увеличивается с увеличением размеров.

Частота срабатывания (Response Frequency), Гц, (частота переключений датчика). Частотой срабатывания больше у датчиков, питающихся от постоянного напряжения.

Тип выходного каскада – одна из важнейших характеристик датчиков приближения. Датчики могут быть двух- и трехпроводными с нормально замкнутыми и нормально разомкнутыми контактами.

Выходной ток, мА – ток, который способен обеспечить выходной каскад датчика.

Собственное падение напряжения, В, характеризует падение на датчике в замкнутом состоянии.

Собственный потребляемый ток, мА, измеряется для случая разомкнутых выходных контактов, то есть, когда через нагрузку не протекает ток.

Эксплуатационные характеристики. При использовании датчиков в жестких условиях промышленного производства следует помнить о таких параметрах как сопротивление изоляции, электрическая прочность, стойкость к вибрационным и ударным нагрузкам, рейтинг пыле- и влагозащищенности, рабочий диапазон температуры влажности.

Недостатки емкостных датчиков

Для конденсатора диэлектрическая проницаемость – основной параметр. Пластины конденсатора, окруженные воздухом, подвержены влиянию температуры окружающей среды, а также влажности воздуха. При использовании данного типа датчика необходимо строго следить за условиями внешней среды и контролировать качественный состав воздуха, потому что различие диэлектрических проницаемостей воздуха и воды вносит существенные корректировки в итоговый результат измерения расстояния.

Емкостные датчики применяются в основном в герметичных условиях, параметры которых могут жестко контролироваться человеком. Для производственных цехов и, в частности, для контроля биений бурильных труб, емкостные датчики не подходят. Условия внешней среды сильно влияют на конечный результат, особенно загрязнения поверхности, образование конденсата на трубах и возникновение электростатического заряда вследствие трения внесут большую погрешность в измерение расстояния до трубы.

Трение, вращение или скольжение объекта контроля при работе с емкостными датчиками может быть фатальным: в экстремальных случаях датчик не будет работать совсем или, что хуже, электростатические возмущения будут приводить к правдоподобным, но неверным показаниям датчика. Это происходит, потому что емкостный эффект основан на хранении электрического заряда на пластинах конденсатора. Для снижения влияния накопленного электростатического заряда в некоторых случаях компоненты объекта заземляют, что помогает рассеивать заряд.

2.3.3 Обзор серий фирм-производителей

1) Серия СМ [25]

Датчики емкостного типа серии СМ, СМ F применяются для обнаружения предметов из металла, пластмассы, стекла, воды, масла и пр. на расстоянии до 25мм.

Датчики емкостного типа серии СМ, СМ F соответствуют стандарту ISO 9001.

Производитель: НПК «Электроэнергетика» предприятие-поставщик электротехнического оборудования Московской области.

Таблица 2.3.2 – Параметры емкостных датчиков серии СМ

Наименование	Напряжение питания, В	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания, Гц	Выходной сигнал
СМ12-3004NA	6 - 36	4	50	NPN (PNP под заказ), открытый коллектор
СМ18-3008NA		8		
СМ24-3012NA		12		
СМ30-3015NA		15		

2) Серия CAP [26]

Производитель: KIPPRIBOR, Россия.

Таблица 2.3.3 – Параметры емкостных датчиков серии CAP

Наименование	Напряжение питания	Диаметр корпуса	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Максимальная частота срабатывания, Гц
CAP18х- хх.хххх.U1.K	10...30 VDC	18 мм	16 мм (утапливаемое исп.), 25 мм (неутапливаемое исп.)	100
CAP18 х- хх.хххх.U9.K	20...250 VAC/VDC		8 мм (утапливаемое исп.), 15 мм (неутапливаемое исп.)	25 Гц (при AC питании); 40 Гц (при DC питании)
CAP30 х- хх.хххх.U1.K	10...30 VDC	30 мм	20 мм (утапливаемое исп.), 30 мм (неутапливаемое исп.)	100
CAP30 х- хх.хххх.U9.K	20...250 VAC/VDC		20 мм (утапливаемое исп.), 25 мм (неутапливаемое исп.)	25 Гц (при AC питании); 40 Гц (при DC питании)

3) Серия ВБ1 [27]

Производитель: ОВЕН-ПРОМ, Россия.

Таблица 2.3.4 – Параметры емкостных датчиков серии ВБ1

Тип корпуса	Параметры корпуса	Длина корпуса, мм	Максимальное расстояние срабатывания, мм
18М	Резьба М18	75/90	10
30М	Резьба М30	53-130	20
33	Корпус 60	-	30
G3/4	Резьба G3/4 Материал – ПФС- пластик	80/85	3

4) Серия PS1 [29]

Производитель: ОВЕН-ПРОМ, Россия.

Таблица 2.3.5 – Параметры емкостных датчиков серии PS1

Тип корпуса	Параметры корпуса	Длина корпуса, мм	Максимальное расстояние срабатывания, мм
30M	Резьба M30×1,5 Материал – латунь	53	20
		65	
		80	
		85	
		115	

5) Серия CS-N [31]

Производитель: ТЭКО, Томск.

Таблица 2.3.6 – Параметры емкостных датчиков серии CS-N

Наименование	Диапазон температур	Напряжение питания, $U_{раб}$	Расстояние срабатывания, мм
CSN E8A5-20-N-L	$-25^{\circ}\text{C} \leq T_{amb} \leq +75^{\circ}\text{C}$	7,7...8,7 В	20
CSN E8A5-20-N-L-C	$-45^{\circ}\text{C} \leq T_{amb} \leq +65^{\circ}\text{C}$		
CSN E8A5-20-N-L-C2	$-60^{\circ}\text{C} \leq T_{amb} \leq +90^{\circ}\text{C}$		
CSN E8A5-20-N-L-H	$-15^{\circ}\text{C} \leq T_{amb} \leq +105^{\circ}\text{C}$		

6) Серия CM30 [32]

Производитель: PIL Sensoren GmbH (Германия).

Таблица 2.3.7 – Параметры емкостных датчиков серии CM30

Наименование	Тип выхода	Напряжение питания, $U_{раб}$	Расстояние срабатывания, мм
CM30-3015NA, CM30-3015NB, CM30-3015NC	NPN	6 – 36 VDC	0..15 мм
CM30-3015PA, CM30-3015PB, CM30-3015PC	PNP		
CM30-2015A, CM30-2015B	Двухпроводные	90 – 250 VAC	

7) Серия CS10 [33]

Производитель: KIPPRIBOR, Россия.

Таблица 2.3.8 – Параметры емкостных датчиков серии CS10

Наименование	Измерительный диаметр	Материал	Расстояние срабатывания, мм
CS10	17,8 мм	Не магнитный	5..10 мм

8) Серия AS-563 [34]

Производитель: Autonics Corporation (Корея)

Таблица 2.3.9 – Параметры емкостных датчиков серии AS-563

Наименование	Выходное напряжение	Линейность	Расстояние срабатывания, мм
AS-563	0 to 10VDC	±0.02%	0..12,5 мм

9) Серия HPC-500 [35]

Производитель: CAPASITEC, Франция.

Таблица 2.3.10 – Параметры емкостных датчиков серии HPC-500

Наименование	Максимальная рабочая температура	Линейность	Расстояние срабатывания, мм
HPC-500	205°C	±0.325%	0..12,70 мм

10) Серия DS [36]

Производитель: РусАвтоматизация, Челябинск.

Таблица 2.3.11 – Параметры емкостных датчиков серии DS

Наименование	Выходной сигнал, В	Напряжение питания, U _{раб}	Расстояние срабатывания, мм
DS20	0-5/0-10	12 to 24 В	20
DS50			50
DS100			100
DS250			250

11) Сравнение серий

Таблица 2.3.12 – Параметры емкостных датчиков разных серий

Наименование серии	Линейность, %	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Погрешность при максимальном значении расстояния срабатывания	Разрешение	Цена, т.р.
СМ	±0.1	4/8/12/15	≤ 600 мкм (12 мм) / 750 мкм (15 мм)	1 мкм	3,5

CAP	± 2	8/15/16/20/25/30	≤ 150 мкм (15 мм) / 160 мкм (16 мм) / 200 мкм (20 мм) / 250 мкм (25 мм) / 300 мкм (30 мм)		3,6
BB1	± 1	3/10/20/30	≤ 100 мкм (10 мм) / 200 мкм (20 мм) / 300 мкм (30 мм)	1 мкм	3
PS1	± 3	4..20	≤ 200 мкм (20 мм)		2
CS-N	$\leq \pm 5$	20	≤ 100 мкм	1 мкм	3
CM30	± 1	15	≤ 150 мкм		2
CS10	$\leq \pm 0,15$	5..10	-	7,5 нм	11
AS-563	± 0.02	12,5	$\leq 1,25$ мкм		21
HPC-500	± 0.325	12,7	$\leq 1,27$ мкм	10 нм	45
DS	± 0.1	20/50/100/250	≤ 600 мкм (20 мм) / 1500 мкм (50 мм)	6,25 мкм	63,7

По результатам проведенного исследования мы не можем применять емкостные датчики при измерении расстояния до бурильных труб, так как в недостатки датчиков данного типа входит зависимость погрешности измерения от накопленного электростатического заряда. В жестких условиях эксплуатации при трении труб возникает заряд, который влияет на емкость результирующего конденсатора. Из-за этого данный тип датчиков не подходит.

На основе вышеизложенного сравним индуктивные и емкостные датчики в таблице 2.3.13

Таблица 2.3.13 – Сравнение индуктивных и емкостных бесконтактных датчиков

Параметр	Емкостные	Индуктивные
Высокое разрешение	+	+
Высокая повторяемость	+	+
Высокая точность	+	+
Устойчивость к грязи, воде или конденсату	—	+
Устойчивость к электростатике	—	+
Устойчивость к электромагнитным помехам	+	+
Низкий температурный дрейф	—	—
Компактный	+	—
Лёгкий	+	—

2.4 Вихретоковые датчики положения и перемещения объектов

2.4.1 Физические основы вихретоковых датчиков положения и перемещения объектов

Принцип действия вихретоковых датчиков положения заключается в зависимости их выходной характеристики от вихревых токов, индуцируемых в проводящем объекте. Круговые токи формируют магнитное поле, направленное навстречу полю катушки. Чем ближе объект находится около катушки, тем сильнее изменяется ее магнитное сопротивление. Толщина слоя, в котором циркулируют вихревые токи, определяется выражением:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

где: f - частота;

μ - магнитная проницаемость материала;

σ - удельная проводимость объекта.

Диапазон рабочих частот вихретоковых датчиков находится в пределах нескольких десятков мегагерц (0 - 10000 Гц). При работе с металлизированными покрытиями объектов работать лучше в другом диапазоне.

Большой недостаток вихретоковых датчиков заключается в том, что выходная характеристика является нелинейной (неравномерность амплитудно-частотной характеристики не превышает 0,5 дБ) и зависимой от температуры.

Помимо измерения датчики такого типа применяются для диагностики состояния промышленных турбин, компрессоров, электромоторов. Часто контролируемым объектом является осевое смещение и радиальная вибрация вала ротора относительно корпуса.

На рис. 2.4.1 изображена вихретоковая датчиковая система, состоящая из бесконтактного вихревого пробника, удлинительного кабеля и драйвера.



Рисунок 2.4.1 – Вихретоковая датчиковая система

Пробник: металлический зонд с диэлектрическим наконечником на одном конце и небольшим отрезком коаксиального кабеля на другом.

Через кабель пробник подключен к драйверу.

Драйвер: электронный блок, вырабатывающий высокочастотные колебания в катушке пробника. Колебания создают электромагнитное поле, взаимодействующее с материалом контролируемого объекта. Драйвер осуществляет выделение информативного параметра.

На выходе датчика присутствует электрический сигнал, который пропорционален измеряемому расстоянию от торца вихревого пробника до контролируемого объекта.

Внутри торца диэлектрического наконечника вихревого пробника находится катушка индуктивности. После создания электромагнитного поля, на поверхности электропроводящего материала наводятся вихревые токи, изменяющие параметры катушки: активное и индуктивное сопротивление. При увеличении или уменьшении расстояния до контролируемого объекта меняются и параметры сопротивления. На этом этапе драйвер приводит поступившую информацию в электрический сигнал, после чего осуществляет его линеаризацию и масштабирование.

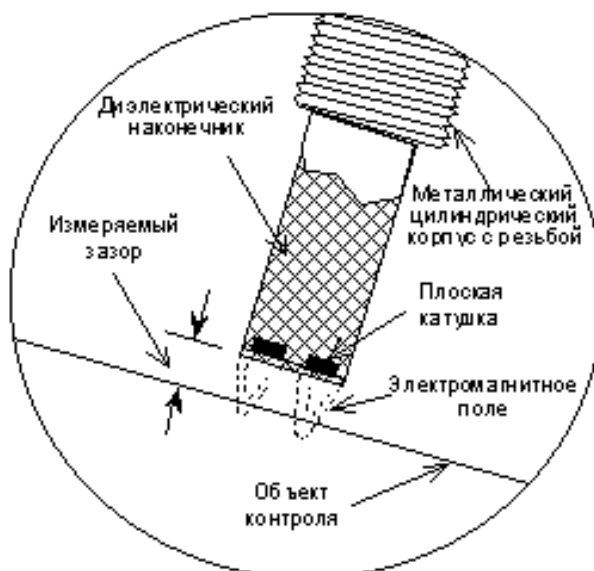


Рисунок 2.4.2 – Конструкция вихретоковой системы

2.4.2 Конструкция вихретоковых датчиков положения и перемещения объектов

Самой распространенной конструкцией датчиков является пробник (зонд).

Использование соединительного кабеля, состоящего из двух частей - кабеля пробника и удлинительного кабеля выгодно с технологической точки зрения, потому что становится возможным менять длину системы типовыми наборами удлинительных кабелей разной длины. Для защиты от механического повреждения весь кабель или его отдельные части армируются.

Драйвер представляет собой герметичную металлическую коробку, на которой имеется коаксиальный соединитель для подключения кабеля, а также клеммы питания, земли, общего провода и выходного сигнала.

Входной параметр: величина зазора между торцом пробника и электропроводящим объектом, которая составляет несколько миллиметров и зависит от диаметра катушки, заключенной в торце диэлектрического наконечника.

Выходной сигнал: представлен в виде напряжения, тока или в цифровом формате (определяется типом системы наблюдения).

Устройства, сочетающие функции драйвера и дополнительного формирователя, называют трансмиттерами.

2.4.3 Зависимость погрешности от магнитных свойств контролируемого объекта

Значение выходного значения вихретокового фазового метода подвержено внешним мешающим воздействиям. При сравнительных измерениях на объектах из сталей с отличающимися магнитными свойствами, ошибка в результатах измерений составляла 2,5%. Это объясняется тем обстоятельством, что при использовании вихретокового фазового метода при оптимизации рабочей частоты магнитное поле из-за вихревых токов настолько ослабляется, что различия в свойствах не оказывают заметного воздействия на результат измерения.

Если изменяется фаза, то влияние на погрешность измерения будет сильнее, чем в случае изменения длины вектора.

Достоинства вихретокового метода:

- точность ввиду отсутствия нижней частотной границы, а также математической обработки результатов измерения;
- прямое соответствие выходного сигнала контролируемому расстоянию.

Недостатки вихретокового метода:

- возможное искажение одного параметра другими, при организации многокоординатного контроля;
- контроль только электропроводящих изделий;
- величина проникновения вглубь материала может вносить погрешность в измерение расстояния.

2.4.4 Обзор серий фирм-производителей

1) Серия SM [37]

Производитель: Micro-Epsilon, США.

Таблица 2.4.1 – Параметры вихретоковых датчиков серии SM

Наименование	Напряжение питания, В	Расстояние срабатывания, мм	Частота срабатывания	Материал объекта контроля
SM12	5 – 24VDC	10	320 кГц	Металл
SM14				

SM18				
------	--	--	--	--

2) Серия VK [38]

Производитель: Shinkawa Electric Co., Ltd., Япония

Таблица 2.4.2 – Параметры вихретоковых датчиков серии VK

Наименование	Напряжение питания, В	Расстояние срабатывания, мм	Коэффициент преобразования	Линейный диапазон
VK-143P	24VDC	14	0.8 В/мм	Более 13,5 мм (начинается на расстоянии 0.3мм от катушки датчика)
VK-263P		26	0.4 В/мм	Более 26 мм (начинается на расстоянии 0.3мм от катушки датчика)

На представленных ниже рисунках приведены амплитудная характеристика датчиков указанной серии.

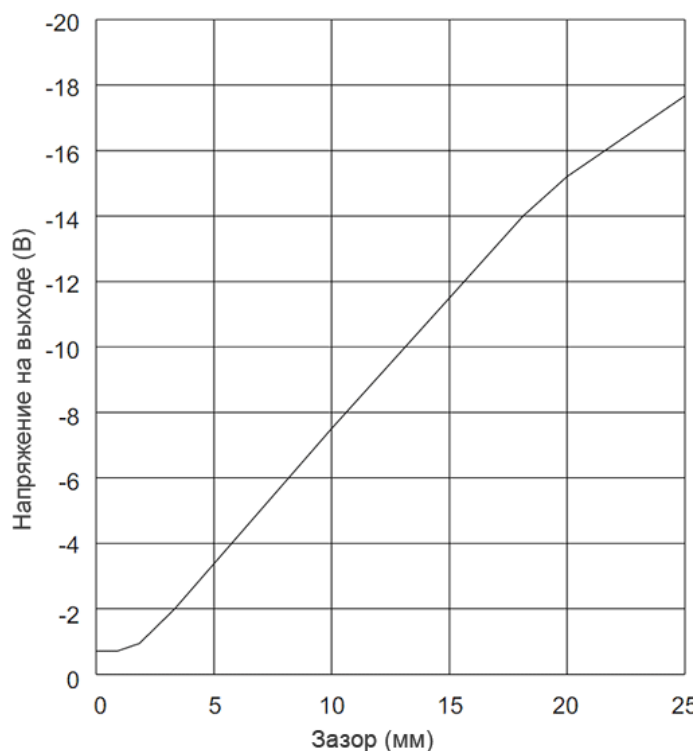


Рисунок 2.4.3 – Амплитудная характеристика вихретокового датчика серии VK

3) Серия TX [39]

Производитель: eddylab GmbH, Германия.

Таблица 2.4.3 – Параметры вихретоковых датчиков серии TX

Наименование	Выходное напряжение, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Линейность
TX	0...10, 0...5, ± 5	0.5 – 10	IP68	± 0.15 %

4) Серия AX2 [40]

Производитель: eddylab GmbH, Германия.

Таблица 2.4.4 – Параметры вихретоковых датчиков серии AX2

Наименование	Выходное напряжение, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Линейность
AX2	10, 5	0.5 – 10	IP68	± 2 %

5) Серия EU [41]

Производитель: Micro-Epsilon, США.

Таблица 2.4.5 – Параметры вихретоковых датчиков серии EU

Наименование	Частотная характеристика	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Линейность
EU15	До 100 кГц	15	IP64	$< \pm 30$ мкм
EU22		22	IP64	$< \pm 44$ мкм
EU40		40	IP64	$< \pm 80$ мкм
EU80		80	IP64	$< \pm 160$ мкм

6) Серия AX1 [42]

Производитель: eddylab GmbH, Германия.

Таблица 2.4.6 – Параметры вихретоковых датчиков серии AX1

Наименование	Выходное напряжение, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Линейность
AX2	10, 5	0.5 – 10	IP68	± 2 %

7) Серия ДВТ [43], [44]

Производитель: НПП «Вибробит», Ростов-на-Дону.

Таблица 2.4.7 – Параметры вихретоковых датчиков серии ДВТ

Наименование	Рабочий температурный диапазон, °С	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Линейность
ДВТ60.16	от -40 до +180	0..12	IP67	$\pm 2,5$ %

ДВТ60.20		0..16		
----------	--	-------	--	--

8) Сравнение серий

Таблица 2.4.8 – Параметры вихретоковых датчиков разных серий

Наименование серии	Линейность, %	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Погрешность при максимальном значении расстояния срабатывания	Разрешение	Цена, т.р.
SM	±0.1	0..10	≤ 0,1 мм	0,1 мкм	17
VK	±4	0..26	≤ 0,26 мм		65
TX	±0.15	0.5..10	≤ 10 мкм	0,03 мкм	55
AX2	±2				От 50
EU	≤ ± 0.025	0..80	≤ 80 мкм	0,1 мкм	80
AX1	±2	0.5..10	≤ 0,20 мкм	0,03 мкм	От 50
ДВТ	±2,5	0..16	≤ 0,32 мм	0,1 мкм	-

По результатам проведенного исследования были подобраны несколько максимально оптимальных по характеристикам датчиков. По разрешению подходят все серии, AX1 и AX2 имеют максимальное расстояние срабатывания 10 мм, разрешение этих датчиков очень высокое, стоимость датчиков зависит от конструктивного исполнения, курса валюты и количества товаров в заказе. Начальная стоимость начинается от 50 т.р.

Серия EU самая дорогая из всех здесь представленных, но она единственная может охватывать диапазон 50 мм.

Серия VK хоть и удовлетворяет параметрам технического задания, ее линейность является достаточно большой для наших целей.

Для наших целей выбираем серии вихретоковых датчиков: SM, так как его максимальный диапазон срабатывания охватывает 10 мм, а стоимость является наименьшей.

Для контроля 50 мм выбор падает на серию EU. Хотя они и самые дорогие, вихретоковых датчик, удовлетворяющих всем указанным характеристикам, с максимальным расстоянием срабатывания 50 мм больше нет.

2.5 Ультразвуковые датчики положения и перемещения объектов

2.5.1 Физические основы ультразвуковых датчиков положения и перемещения объектов

Для определения расстояния до объекта ультразвуковой датчик излучает импульс ультразвука, после чего запускает внутренний таймер, отсчитывающий время до возвращения импульса. Полученное время используется встроенным микропроцессором для расчета расстояния до объекта. Микропроцессор обеспечивает высокую линейность.

Разрешение у ультразвуковых датчиков слишком большое для установленных в техническом задании параметров и достигает 0,2 мм.

Так как пьезоэлектрический преобразователь может служить как излучателем, так и приемником ультразвуковых импульсов, ультразвуковые датчики расстояния могут работать с одним преобразователем.

Ультразвуковые датчики применяются для измерения расстояния до сложных объектов, например, сыпучих веществ, жидкостей, гранул, прозрачных или, напротив, сильно отражающих поверхностей. Ультразвуковыми датчиками, ко всему прочему, можно измерять сравнительно большие расстояния, сохраняя небольшие размеры измерительного прибора, что может быть существенно для ряда применений.

К недостаткам ультразвуковых датчиков можно отнести невозможность проведения контроля расстояния на поверхности, содержащей пену и другие объекты, сильно поглощающие ультразвуковые колебания. На сильно изогнутых поверхностях ультразвуковые датчики применять также не рекомендуется, потому что работа при таких условиях снижает расстояние и точность измерений. Происходит это потому что ультразвуковые колебания рассеиваются в различных направлениях. Ультразвуковые датчики излучают импульс в виде широкого конуса, это ограничивает возможность измерения расстояния до небольших объектов. Если контроль проводится при таких условиях, уровень помех от находящихся рядом объектов значительно возрастает, они вносят свои коррективы в показания датчика.

На российском рынке электронных приборов можно найти ультразвуковые датчики, имеющие импульсный конус с углом всего 5 градусов. Благодаря такому параметру, их применяю для измерения расстояния до маленьких объектов, таких, например, как бутылки или ампулы [3].

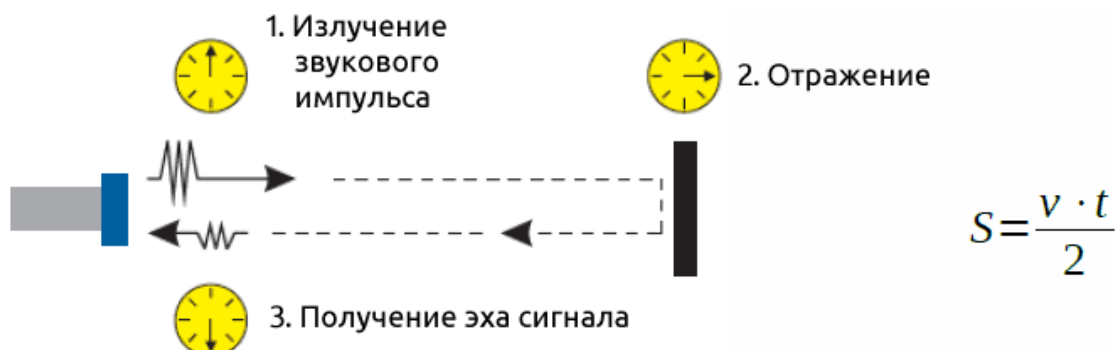


Рисунок 2.5.1 – Принцип работы ультразвукового датчика

Недостатки

- Датчики сквозного луча должны находиться друг напротив друга, из-за чего стоимость монтажа повышается;
- Датчики диффузного отражения активируются медленнее других;
- Плохо работают в запыленных и загазованных средах.

2.5.2 Обзор серий фирм-производителей

1) Серия UFA [45]

Производитель: WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Германия.

Таблица 2.5.1 – Параметры ультразвуковых датчиков серии UFA

Наименование	Напряжение питания, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Линейность
UFA-150-FB	15...30	0 ... 150	IP67	<1% полной шкалы
UFA-200		20 ... 200		

2) Серия UFP [46]

Производитель: WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Германия.

Таблица 2.5.2 – Параметры ультразвуковых датчиков серии UFP

Наименование	Напряжение питания, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Линейность
UFP-200	0...10	25...200	IP65	<1% полной шкалы

3) Ультразвуковые датчики диффузного типа Pepperl+Fuchs (Германия) [47]

Таблица 2.5.3 – Параметры ультразвуковых датчиков

Наименование	Напряжение питания, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Линейность
UB120-12GM-E4-V1 UB120-12GM-E5-V1 UB120-12GM-I-V1 UB120-12GM-U-V1	10...30 В	15...120	IP67	±0,1
UB100-F77-E0-V31 UB100-F77-E1-V31 UB100-F77-E2-V31 UB100-F77-E3-V31	20...30 В	10...100		±0,1
UB120-F12P-EP-V15	10...30	10...150	IP54	

4) Ультразвуковые датчики положения Baumer (Швейцария) [48]

Таблица 2.5.4 – Параметры ультразвуковых датчиков

Наименование	Напряжение питания, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Линейность
UNDK 10 UNDK 20	12...30 В	10...200	IP67	±0,1 %
UNAM 12		5...70		±0,1 %

5) Ультразвуковые датчики перемещения Baumer (Швейцария) в цилиндрическом корпусе UNAM 12 [49]

Таблица 2.5.5 – Параметры ультразвуковых датчиков UNAM 12

Наименование	Напряжение питания, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Линейность
UNAM 12	15 ... 30	2 ... 82	IP67	±0,1 %

6) Ультразвуковые датчики перемещения Baumer (Швейцария) в цилиндрическом корпусе UZDK 30 [50]

Таблица 2.5.6 – Параметры ультразвуковых датчиков UZDK 30

Наименование	Напряжение питания, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Линейность
UZDK 30	12 ... 30	30...250	IP67	±0,1 %

7) Ультразвуковые датчики перемещения SM350A22800 [51]

Производитель: Schneider Electric Global (Франция).

Таблица 2.5.7 – Параметры ультразвуковых датчиков SM350A22800

Наименование	Напряжение питания, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Погрешность, %
SM350A22800	12-24	6.3...50.8	IP67	± 0.7

8) Ультразвуковые датчики перемещения UC500-18GS-2EP-IO-V15 [52]

Производитель: Pepperl+Fuchs (Германия).

Таблица 2.5.8 – Параметры ультразвуковых датчиков UC500-18GS-2EP-IO-V15

Наименование	Напряжение питания, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Погрешность, %
UC500-18GS-2EP-IO-V15	10 ... 30	30...500	IP67	± 0.1

9) Серия XX [53]

Производитель: Schneider Electric Global (Франция).

Таблица 2.5.9 – Параметры ультразвуковых датчиков серии XX

Наименование	Напряжение питания, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Погрешность, %
XX512A1x	12...24	6.4...51	IP67	± 0.1
XX512A2x		6.4...102		
XXV18B1x		2...50		
XX518A1x		25...152		

10) Серия ZWS-15/CD/QS [54]

Производитель: microsonic, Германия.

Таблица 2.5.10 – Параметры ультразвуковых датчиков серии ZWS-15/CD/QS

Наименование	Напряжение питания, В	Расстояние срабатывания, мм	Степень защиты	Погрешность, %
ZWS-15/CD/QS	20 - 30	20 - 150	IP67	± 0.1

11) Сравнение серий

Таблица 2.5.11 – Параметры ультразвуковых датчиков разных серий

Наименование серии	Линейность, %	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Погрешность при максимальном значении расстояния срабатывания	Разрешение	Цена, т.р.
UFA	$<\pm 1$	0 ... 150	$\leq 2,25$ мм	0,5 мм	32
UFP-200	$<\pm 0,5$	25...200	≤ 6 мм	до 0,125 мм	31
UB120	$\pm 0,1$	15...120	$\leq 1,2$ мм	0,1 мм	30
UB100		10...100	≤ 1 мм		14
UNDK	± 1	10...200	≤ 3 мм	$< 0,5$ мм	41
UNAM 12		5...70	$\leq 1,05$ мм		12
UNAM 12 цилиндр.		2 ... 82	$\leq 1,23$ мм	$< 0,3$ мм	16
UZDK 30	± 2	30 ... 250	$\leq 12,5$ мм	$< 0,5$ мм	34
SM350A22800	$\pm 0,1$	6.3...50.8	$\leq 0,36$ мм	0,1 мм	38
UC500-18GS-2EP-IO-V15		30...500	$\leq 0,5$ мм		37
XX	± 1	2...50/6.4...51/6.4...102	≤ 1 мм/ 1,02 мм/ 2,04 мм	0,1 мм	40
ZWS-15/CD/QS	$\pm 0,1$	20 .. 150	$\leq 0,22$ мм		50

По результатам проведенного исследования ни один из представленных ультразвуковых датчиков не подошел из-за высокого значения разрешения.

2.6 Оптические бесконтактные датчики расстояния

2.6.1 Физические основы оптических бесконтактных датчиков расстояния

Основным отличием оптических датчиков от датчиков другого типа (индуктивных, емкостных и т.п.) является способность обнаруживать объекты практически из любого материала и способность обнаруживать объекты на значительном расстоянии (S_n от 400 мм до 20 метров).

Лазерные интерферометры имеют как достоинства, так и недостатки: они могут работать на большом диапазоне измерений и иметь точность в несколько нанометров, но эти приборы очень дорогие и сложные в эксплуатации.

Оптические датчики с рассеянным отражением и аналоговым выходом измеряют расстояния в широких пределах, однако могут быть проблемы с измерением расстояний до окрашенных или отражающих объектов, поскольку

они работают с отраженным светом. Оптические датчики радарного типа, преимущественно лазерные, измеряют расстояния до десятков метров, но при этом теряют разрешение, которое ограничивается 2 – 3 мм. Оптические датчики радарного типа работают по принципу измерения времени распространения света от датчика до объекта и обратно.

2.6.2 Триангуляционный принцип измерения расстояния до объекта лазерным датчиком

2.6.2.1 Физические основы триангуляционного датчика измерения расстояния до объекта

Принцип работы лазерного датчика: приемник датчика излучает луч лазера с высокой параллельностью пучка. При падении луча на поверхность, должен соблюдаться закон отражения света.

Закон отражения света: луч света, падающий на поверхность, имеет угол отражения, равный углу падения.

На контролируемой поверхности всегда найдется несколько точек, от которых луч отразится и попадет в приемник, как бы объект не был расположен в пространстве. В зависимости от угла падения луча лазера датчик измеряет расстояние до поверхности: угол измеряется в зависимости от величины расстояния до объекта. Следовательно, изменяется положение точки лазера на приемнике, представляющем из себя фотодиодную линию.

Принцип работы триангуляционного датчика изображен на рис. 2.6.1:

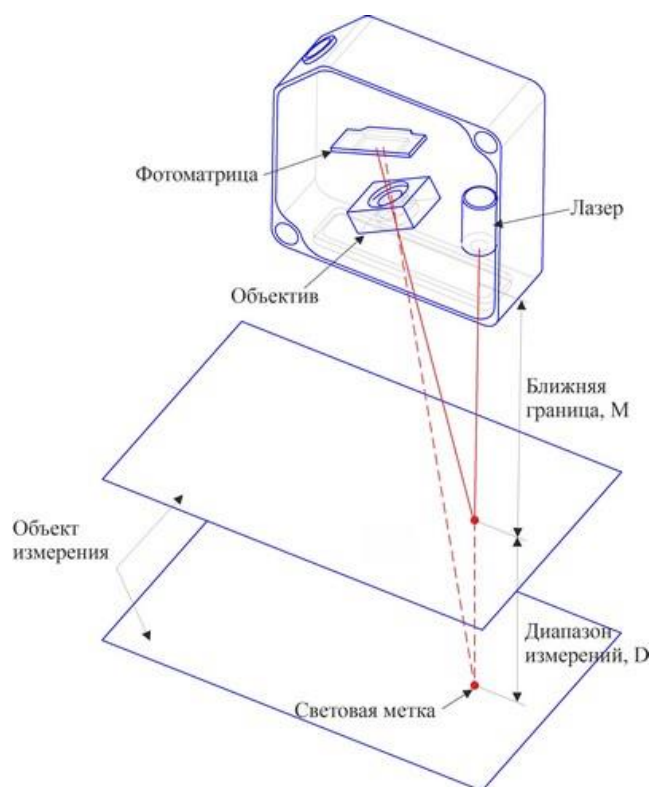


Рисунок 2.6.1 – Принцип работы триангуляционного датчика

Из недостатков оптических датчиков следует выделить их сильная зависимость погрешности измерения от температуры механических элементов датчика, формы контролируемого объекта (желательная прямая поверхность), а также наличие «слепой» зоны.

2.6.2.2 Сравнение серий оптических датчиков

1) Серия ОК50 [28]

Производитель: KIPPRIBOR, Россия.

Таблица 2.6.1 – Параметры лазерных датчиков серии ОК50

Наименование	Напряжение питания	Коммутационная функция	Максимальное расстояние срабатывания, мм
Датчики с универсальным питанием			
OK50-DI0040R4.U6.K	10...30 VDC	NO+NC	0,4
OK50-DI0100R4.U6.K			1
OK50-DI0200R4.U6.K			2
OK50-RR0600R4.U6.K.F			6
OK50-RI1000R4.U6.K			10
OK50-TI2000R4.U6.K			20
Датчики с универсальным питанием			
OK50-DI0040S3.U1.K	10...30 VDC		0,4
OK50-DI0100S3.U1.K			1
OK50-DI0200S3.U1.K			2

OK50-RR0600S3.U1.K.F		Программируемый выход NO/NC	6
OK50-RI1000S3.U1.K			10
OK50-TI2000S3.U1.K			20

2) Серия OA18 [28]

Производитель: KIPPRIBOR, Россия.

Таблица 2.6.2 – Параметры лазерных датчиков серии OA18

Наименование	Напряжение питания	Диаметр корпуса	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Максимальная частота срабатывания, Гц
OA18-T	10...30 VDC	18 мм	15	100
OA18-D			0,15; 0,5	25 Гц (при AC питании); 40 Гц (при DC питании)
OA18-R		30 мм	1; 3	100

3) Серия LAR [55]

Производитель: WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Германия.

Таблица 2.6.3 – Параметры лазерных датчиков серии LAR

Наименование	Напряжение питания	Степень защиты	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Разрешение, мкм
LAR-10-5V	12...24 В	IP67	25...35	10
LAR-30-5V			35...65	30

4) Серия RAS [56]

Производитель: WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Германия.

Таблица 2.6.4 – Параметры лазерных датчиков серии RAS

Наименование	Напряжение питания	Степень защиты	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Разрешение, мм
RAS-T5-40	12...28 В	IP67	25...35	0,004...0,02
RAS-T5-100			35...65	0,005...0,06
RAS-TM-10			16...26	0,002...0,005
RAS-TM-104			16...120	0,002...0,12

В документации датчиков рассматриваемой серии [56] приведены таблицы зависимостей разных величин от расстояния от датчика до объекта (мм):

RAS-T5-40

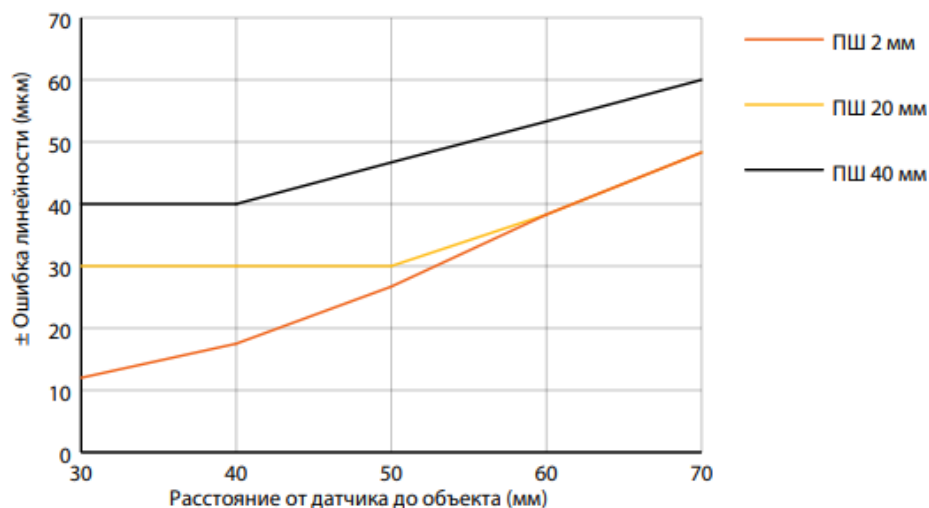


Рисунок 2.6.2 – Зависимость ошибки линейности от расстояния от датчика RAS-T5-40 до объекта

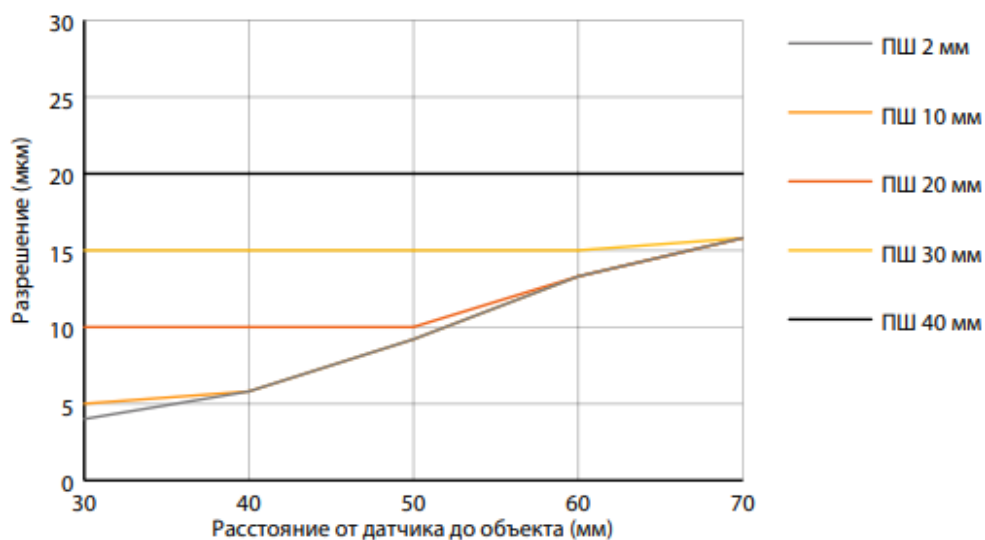


Рисунок 2.6.3 – Зависимость разрешения от расстояния от датчика RAS-T5-40 до объекта

Для датчика RAS-T5-100:

RAS-T5-100

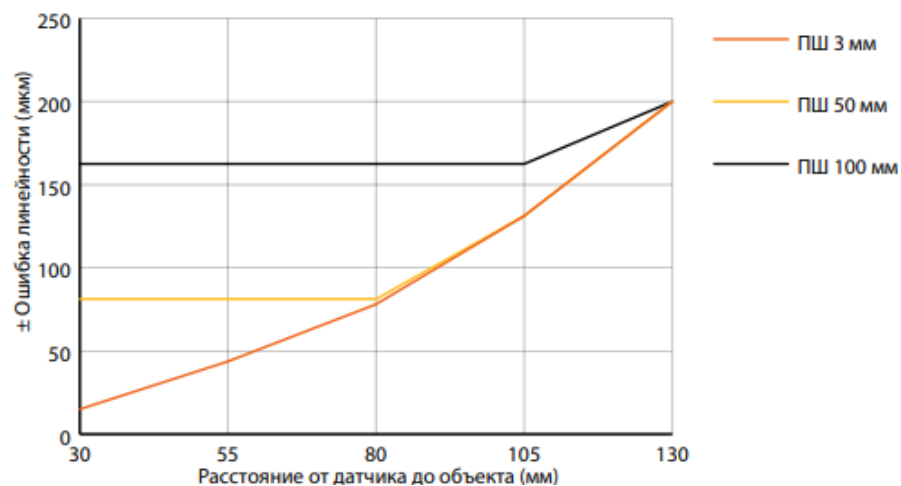


Рисунок 2.6.4 – Зависимость ошибки линейности от расстояния от датчика RAS-T5-100 до объекта

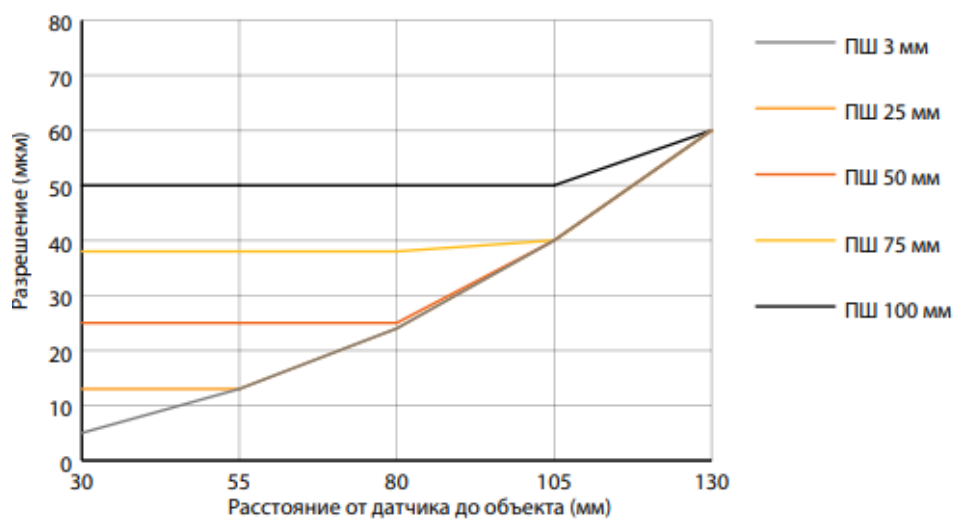


Рисунок 2.6.5 – Зависимость разрешения от расстояния от датчика RAS-T5-100 до объекта

Для датчика RAS-TM-10:

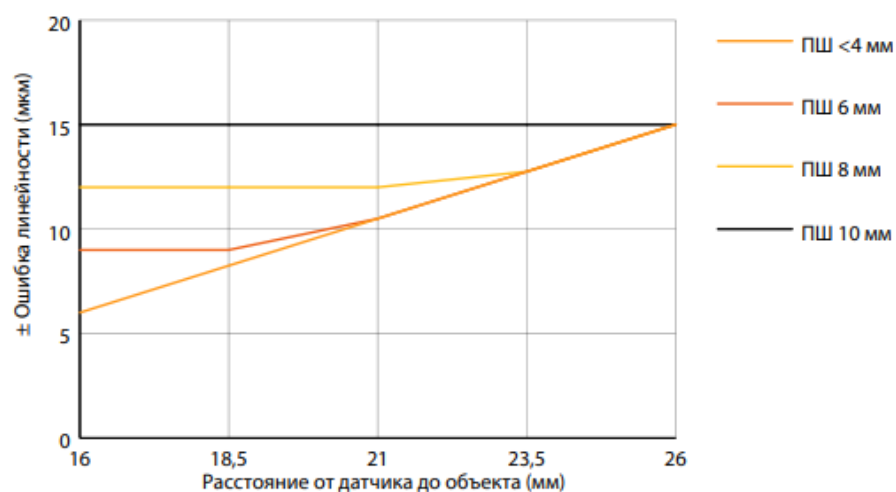


Рисунок 2.6.6 – Зависимость ошибки линейности от расстояния от датчика RAS-TM-10 до объекта

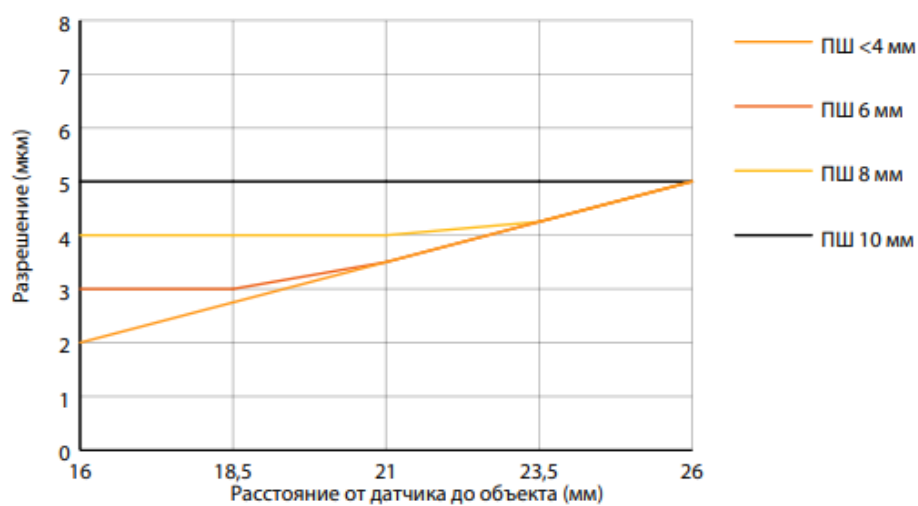


Рисунок 2.6.7 – Зависимость разрешения от расстояния от датчика RAS-TM-10 до объекта

Для датчика RAS-TM-104:

RAS-TM-104

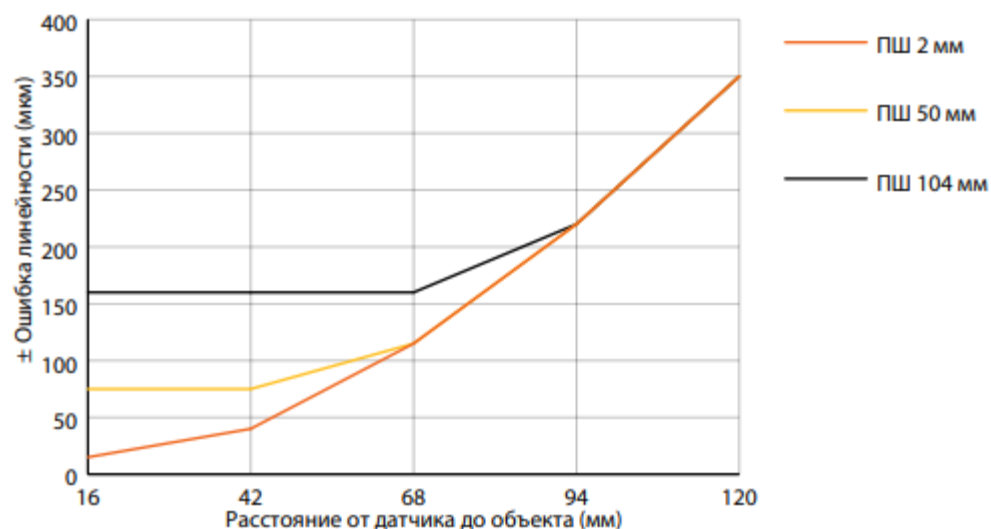


Рисунок 2.6.8 – Зависимость ошибки линейности от расстояния от датчика RAS-TM-104 до объекта

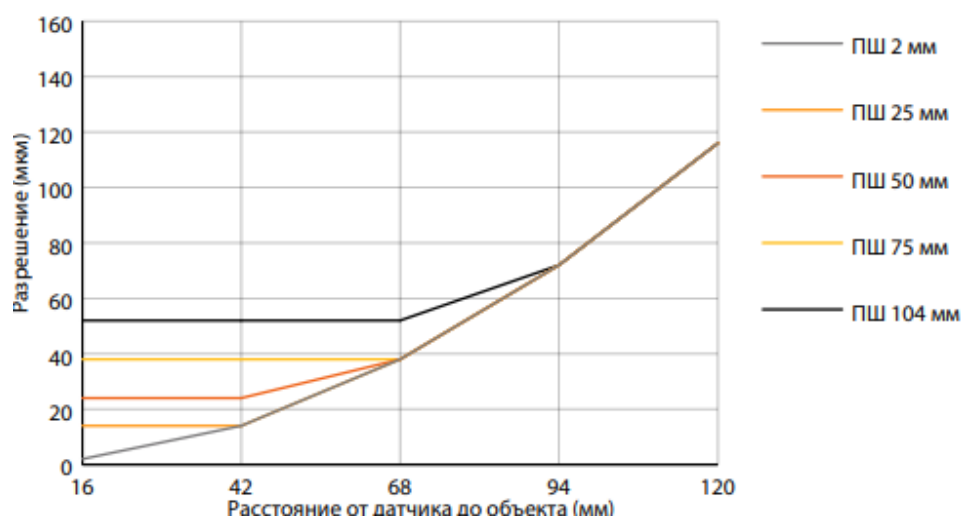


Рисунок 2.6.9 – Зависимость разрешения от расстояния от датчика RAS-TM-104 до объекта

5) Серия LAN-G1 [57]

Производитель: WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Германия.

Таблица 2.6.5 – Параметры лазерных датчиков серии LAN-G1

Наименование	Напряжение питания	Степень защиты	Расстояние срабатывания, мм	Разрешение, мкм
Для диффузионного отражения				
LAN-G105-A-C5	24 В	IP67	40...60	1.5
LAN-G108-			65...105	2.5

A-C5				
LAN-G112-A-C5			60...180	8
LAN-G125-A-C5			100...400	20

6) Серия LAV [58]

Производитель: WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Германия.

Таблица 2.6.6 – Параметры лазерных датчиков серии LAV

Наименование	Напряжение питания	Степень защиты	Расстояние срабатывания, мм	Разрешение, мкм
LAV-8-420-IO	10 – 30 В	IP65	0,2...8,0 (объект: белый 90%)	1
LAV-50-420-IO		IP67	0,2...50,0 (с использованием наклеиваемой метки)	2

Необходимо использовать метку ZT100. Наличие метки существенно влияет на область применения таких датчиков. Организовать наличие метки на бурильной трубе будет проблематично.

7) Серия RLD-150 [59]

Производитель: WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Германия.

Таблица 2.6.7 – Параметры лазерных датчиков серии RLD-150

Наименование	Напряжение питания	Степень защиты	Расстояние срабатывания, мм	Разрешение, мм
RLD-150	10 ... 30 В	IP65	0.1...30 на всех натуральных поверхностях с диффуз. отражением, на наклеиваемой метке до 150 м	0,1

8) Серия optoNCDT [60]

Производитель: фирма "Micro-Epsilon Messtechnik GmbH", Германия.

Таблица 2.6.8 – Параметры лазерных датчиков серии optoNCDT

Наименование	Частота	Расстояние срабатывания, мм	Разрешение, мкм
optoNCDT 1220		10...50	1

optoNCDT 1320	49,140 кГц	10...100	1
optoNCDT 1420		10...500	0,5
optoNCDT 1420 CL1		10...200	0,5
optoNCDT 1750		2...750	0,1
optoNCDT 1900		10...100	0,1
optoNCDT 2300		2...300	0,03
optoNCDT 1750LL		2...50	0,1
optoNCDT 1900LL		10...25	0,1
optoNCDT 2300LL		2...50	0,03
optoNCDT 2300BL		2...50	0,03
optoNCDT 2310		10...50	0,5

9) Серия RF603 [61]

Производитель: Рифтек, Минск.

Таблица 2.6.9 – Параметры лазерных датчиков серии RF603

Наименование	Частота	Расстояние срабатывания, мм	Разрешение, %
X/10	9,4 кГц	0...10	±0.01
X/15		0...15	
X/25		0...25	
X/30		0...30	
X/50		0...50	
X/100		0...100	
X/250		0...250	
X/500		0...500	
X/750		0...750	

10) Серия LAS2-TM [62]

Производитель: WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Германия.

Таблица 2.6.10 – Параметры лазерных датчиков серии LAS2-TM

Наименование	Частота	Расстояние срабатывания, мм	Разрешение, мкм
LAS2-TM-10	5 кГц	16...26	4...5
LAS2-TM-104		16...120	8...100

11) Серия OADM [63]

Производитель: Baumer, Швейцария.

Таблица 2.6.11 – Параметры лазерных датчиков серии OADM

Наименование	Выходной сигнал	Расстояние срабатывания, мм	Разрешение
OADM 12I6430/S35A	4...20 мА	16...26	0,002...0,005 мм
OADM 12I6460/S35A		16...120	0,002...0,12 мм

12) Серия LS5 [70]

Производитель: НПП «Призма», Екатеринбург.

Применение датчика для измерения биений тел вращения: датчики закрепляются на расстоянии 10-100 мм и производят измерение расстояния до тела вращения в течение целого оборота. Используя цифровую обработку замеров, вычисляется величина биения как наибольшая по каждому датчику разность максимального и минимального измеренных им расстояний.

Таблица 2.6.12 – Параметры лазерных датчиков серии LS5

Модель LS5-	Ближняя граница, мм	Диапазон измерения, мм	Разрешение
5/2	5	2	0,1 мкм
6/5	6	5	
10/6	10	6	
20/15	20	15	1 мкм
30/30	30	30	
50/100	50	100	

13) Сравнение серий

Таблица 2.6.13 – Параметры триангуляционных датчиков разных серий

Наименование серии	Линейность, %	Расстояние срабатывания, мм	Погрешность при максимальном значении расстояния срабатывания	Разрешение, мкм	Цена, т.р.
OK50	<±0,1	0 ... 20	≤ 0,2 мм	0,1	5
OA18		0...15	≤ 0,15 мм		3,6
LAR		25...35/35...65	≤ 35 мкм/65 мкм	10/30	100
RAS	±0,1	16...120	≤ 120 мкм	2...120	-
LAH-G1		40...60	≤ 60 мкм	1.5	40
LAV		0,2...50,0	≤ 0,5 мм	2	От 30
RLD-150	±1	0.1...30	≤ 30 мкм	100	От 20
optoNCDT	±0,1	10...50	≤ 50 мкм	1	-
RF603	±0.05	0...50	≤ 50 мкм	100	-
LAS2-TM	±0.13	16...120	≤ 0,12 мм	8...100	От 30
OADM	<0,015%	16...120	≤ 0,12 мм	2...120	От 50
LS5		20...35	≤ 35 мкм	1	60

В результате исследовательской работы триангуляционных датчиков пришли к заключению, что для контроля расстояния подходят все серии, кроме

RAS, RF603 и LAS2-TM. Данные серии исключаются по причине их большого разрешения, превышающего техническое условие.

Из удовлетворяющих техническому заданию триангуляционных датчиков выбираем лучшие по цене, а также расстоянию срабатывания: OK50 и OA18 становятся лидерами в ценовой категории. Серия LS5 имеет хорошие характеристики, а также среднюю ценовую категорию.

Для контроля расстояния до 50 мм лучшая серия – LAV, так как цена его не самая высокая (от 30 т.р.), серия с хорошим разрешением и линейностью.

2.7 Радарные бесконтактные датчики расстояний

2.7.1 Физические основы радарных бесконтактных датчиков расстояний

Принцип работы радарного датчика очень схож с принципом работы ультразвукового датчика: в обоих датчиках расстояние измеряется с помощью отражения звуковой волны, время возвращения которой является основным параметром для определения расстояния до отражающей поверхности. Датчики радарного типа, как было сказано ранее, имеют большой диапазон расстояния срабатывания, однако разрешение при этом достигает недопустимых техническим заданием 2-3 мм.

В радарных датчиках используются электромагнитные импульсы. Высокочастотная энергия измеряется радаром и отражается от наблюдаемого объекта. Некоторая небольшая часть этой отраженной энергии (ЭХО) возвращается обратно к радару. Радар использует это эхо для определения направления и расстояния до отражающего объекта.

2.7.2 Сравнение серий радарных датчиков

1) Радарные датчики расстояния TR-Electronic (Германия)

Радарные датчики расстояния TR-Electronic обеспечивают возможность измерения расстояний до 240 м и вывода данных с помощью SSI, интерфейса полевой шины или промышленной шины Ethernet.

Таблица 2.7.1 – Параметры радарных датчиков серии LE-200 [66]

Наименование	Напряжение питания	Разрешение	Расстояние срабатывания
LE 200 - SSI	18...27 VDC	0,1 мм	0,2 – 125 м стандартное; 170 м, 195 м по заказу
LE 200 - PB			0,2 – 125 м стандартное; 170 м, 195 м, 240 м по заказу
LE 200 - CO			0,2 – 125 м стандартное; 170 м, 195 м по заказу

Таблица 2.7.2 – Параметры радарных датчиков серии LLB-65 [67]

Наименование	Напряжение питания	Разрешение	Расстояние срабатывания
LLB 65 (H) - A	9...30 VDC	0,1 мм	0.05...65 м
LLB 65 - PB			0.05...65 м
LE 200 - CO			0,2 – 125 м стандартное; 170 м, 195 м по заказу

Таблица 2.7.3 – Параметры радарных датчиков серии LLB-500 [68]

Наименование	Напряжение питания	Разрешение	Расстояние срабатывания
LLB-500 Analog + SSI	9...30 VDC	0,1 мм	0.05...65 м без отражателя;
LLB-500 Profibus			0.5...500 м с отражателем

2) Радарные датчики расстояния SICK (Германия)

Таблица 2.7.4 – Параметры радарных датчиков серии RAS4xx [69]

Наименование	Напряжение питания	Разрешение	Расстояние срабатывания
RAS4xx	10...30 VDC	0,5 мм	0.2...20 м

3) Сравнение серий

Таблица 2.7.5 – Параметры радарных датчиков разных серий

Наименование серии	Линейность, %	Расстояние срабатывания	Погрешность при максимальном значении расстояния срабатывания	Разрешение	Цена, т.р.
LE-200	±0,01	0,2 .. 240 м	±2 мм	0,1 мм	От 60

LLB-65		0,05 .. 65 м без отражателя	± 1 мм или $\pm 3,0$ мм согласно типу устройства		От 60
LLB-500		0.05...65 м без отражателя; 0.5...500 м с отражателем	$\pm 0,3$ мм или $\pm 0,5$ мм согласно типу устройства		От 60
RAS4xx	$\pm 0,1$	0.2...20 м	$\pm 0,3$ мм	0,5 мм	От 30

В результате анализа радарных датчиков ни одна существующая серия на российском рынке не подходит под требуемые технические характеристики, так как разрешающая способность, а также расстояние срабатывания намного больше необходимого.

2.8 Результат проведенного исследования

В результате исследовательской работы составим итоговую таблицу сравнения доступных на российском рынке бесконтактных датчиков, подходящих под требования, заданные техническим заданием.

Таблица 2.8 – Параметры датчиков разных серий

Наименование серии	Линейность, %	Максимальное расстояние срабатывания, мм	Погрешность при максимальном значении расстояния срабатывания	Разрешение	Цена, т.р.
Индуктивные датчики					
E2E NEXT	± 0.1	1/2/4/5/8/10/15	≤ 100 мкм (10 мм) / 150 мкм (15 мм)	1 мкм	40
LA	± 0.1	1/2/4/5/8/10/15	≤ 100 мкм (10 мм) / 150 мкм (15 мм)	10 мкм	2
ICB	± 2	2/4/5/8/10/12/15 /22	≤ 1000 мкм (10 мм) / 1200 мкм (12 мм) / 1500 мкм (15 мм) / 2200 мкм (22 мм)	10 мкм	11
LK	± 0.1	1/2/4/5/8/12	≤ 120 мкм	10 мкм	1
Емкостные датчики					
-	-	-	-	-	-
Вихревые датчики					
EU	$\leq \pm 0.025$	15/22/40/80	≤ 15 мкм (15 мм) / 22 мкм (22 мм) / 40 мкм (40 мм)	0,1 мкм	80

SM	±0.1	10	≤ 0,1 мм	0,1 мкм	17
Ультразвуковые датчики					
-	-	-	-	-	-
Оптические датчики					
Триангуляционные датчики					
LAV	±0,1	0,2...50,0	≤ 500 мкм	2 мкм	От 30
OK50		0,4/1/2/6/10/20	≤ 100 мкм (10 мм) / 200 мкм (20 мм)	0,1 мкм	5
OA18		0,15/0,5/1/3/15	≤ 150 мкм (15 мм)		3,6
LS5	<0,015%	20..35	≤ 35 мкм	1	60
Радарные датчики					
-	-	-	-	-	-

Для контроля расстояния между датчиком и трубой подходят следующие методы бесконтактного контроля: индуктивный, вихретоковый и триангуляционный.

Емкостной метод не подходит по причине жестких условий окружающей среды в производственном помещении. Это внесет существенные коррективы в работу датчика.

Ультразвуковые датчики не могут обеспечить установленное разрешение до 10 мкм, а радарные датчики не измеряют расстояние до 50 мм, поэтому они не подходят для измерения расстояния до бурильной трубы.

Для индуктивных датчиков расстояния были выбраны следующие серии: E2E NEXT, LA, ICB, LK. Серии LK и LA самые дешевые среди других. Помимо прочего все параметры удовлетворяют техническому заданию. E2E NEXT выбран для расстояния 50 мм, но имеет самую высокую стоимость среди остальных.

Из серии вихретоковых датчиков лучшими являются SM с низкой стоимостью и максимальным расстоянием измерения 10 мм. Для контроля 50 мм выбрали серию EU, так как она единственная, которая может измерять расстояние в этом диапазоне.

Для оптических датчиков расстояния измерительным методом был выбран триангуляционный. Среди датчиков этой серии лучшими признаны: OK50 и OA18, которые являются лидерами в ценовой категории, серия LS5

обладает хорошими техническими характеристиками, а для контроля расстояния до 50 мм лучшая серия – LAV с хорошим разрешением и линейностью.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

3. 1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Бесконтактные датчики для контроля расстояния находят широкое применение в системах автоматического контроля. В данной исследовательской работе рассматриваются датчики, подходящие для контроля соосности сварных швов бурильных труб. Большинство датчиков из рассматриваемых линеек серии подходят для данного контроля, так как контроль расстояния бесконтактным методом является широко распространенным среди всех методов контроля расстояния. В работе рассматриваются индуктивный, емкостной, вихретоковый, ультразвуковой и оптический методы контроля. Данные приборы широко выпускаются в производстве, однако в силу их большого разнообразия далее будут рассмотрены только два конкурентных технических решения.

3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Бесконтактные датчики расстояния применяются во многих областях неразрушающего контроля, но в качестве целевого рынка потребления в рассматриваемом исследовании данных измерителей выступают предприятия, производящие бурильные трубы.

3.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum_{i=1}^n B_i \cdot b_i, \quad (2)$$

Где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

b_i – балл i -го показателя.

В таблице 3.1 приведена оценочная карта, включающая конкурентное техническое решение, такое, как существующие датчики контроля и самостоятельно собранный датчик бесконтактного индуктивного метода контроля.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 3.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	4	4	0,75	0,6	0,6
2. Надежность	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
3. Безопасность	0,12	5	4	3	0,6	0,48	0,36
4. Простота эксплуатации	0,1	5	5	4	0,5	0,5	0,4
5. Возможность подключения в сеть ПК	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,13	5	3	4	0,65	0,39	0,52
2. Цена	0,2	5	2	3	1	0,4	0,6
33. Финансирование научной разработки	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
Итого	1				4,8	3,37	3,48

Ф – разрабатываемый продукт;

К1 – индуктивные датчики серии LM;

К2 – индуктивные датчики серии RM.

Из результатов проведенного исследования видно, что индуктивный измерительный прибор, полученный в ходе работы, не уступает другим измерительным устройствам.

3.1.3 SWOT – анализ

SWOT – анализ проводится в несколько этапов. Результаты первого этапа, включающего описание сильных и слабых сторон проекта, а также возможностей и угроз, представлены в таблице 2.

Таблица 3.2 – Первый этап SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Простота и удобство эксплуатации. С2. Автоматизированный процесс измерения. С3. Более низкая стоимость по сравнению с другими конкурирующими разработками.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Точность измерения меньше, чем у конкурентов. Сл2. Наличие крупных конкурентов. Сл3. Отсутствие возможности массового производства.
Возможности: В1. Упрощение структурной схемы разработки. В2. Сотрудничество ТПУ с потенциальными потребителями. В3. Повышение функциональности устройства.		
Угрозы: У1. Усовершенствование конкурентных разработок. У2. Удешевление конкурентных разработок. У3. Увеличение сроков поставок комплектующих частей при поломке оборудования.		

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. В рамках данного этапа необходимо составить интерактивные матрицы проекта, которые представлены в таблицах 3, 4, 5 и 6. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие), либо знаком «-» (слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 3.3 – Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны и возможности»

Сильные стороны проекта				
Возможности проекта		C1	C2	C3
	B1	+	+	+
	B2	-	-	+
	B3	+	+	+

Таблица 3.4 – Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны и возможности»

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	-	-	-
	B2	-	-	-
	B3	+	-	+

Таблица 3.5 – Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны и угрозы»

Сильные стороны проекта				
Угрозы		C1	C2	C3
	У1	-	-	-
	У2	-	-	-
	У3	-	-	-

Таблица 3.6 – Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны и угрозы»

Слабые стороны проекта				
Угрозы		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	-	+	-
	У2	-	+	-
	У3	-	-	-

В таблице 3.7 составлена итоговая матрица SWOT-анализа.

Таблица 3.7 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Простота и удобство эксплуатации. С2. Автоматизированный процесс измерения. С3. Более низкая стоимость по сравнению с другими конкурирующими разработками.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Точность измерения меньше, чем у конкурентов. Сл2. Наличие крупных конкурентов. Сл3. Отсутствие возможности массового производства.
Возможности: В1. Упрощение структурной схемы разработки. В2. Сотрудничество ТПУ с потенциальными потребителями. В3. Повышение функциональности устройства.	Упрощение структурной схемы разработки, а также повышение функциональности устройства позволит усилить сильные стороны проекта.	Повышение функциональности устройства поможет снизить влияние слабых сторон в лице крупных конкурентов на проект.
Угрозы: У1. Усовершенствование конкурентных разработок. У2. Удешевление конкурентных разработок. У3. Увеличение сроков поставок комплектующих частей при поломке оборудования.	Усовершенствование измерительного устройства, а также повышение его функциональности ослабит влияние перечисленных угроз.	Усовершенствование конкурентных разработок, удешевление конкурентных разработок, а также увеличение сроков поставок комплектующих частей при поломке оборудования могут привести к потере клиентской базы.

3.2 Планирование научно-исследовательских работ

3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой входят: бакалавр, научный руководитель, консультант по части социальной ответственности (СО) и консультант по экономической части (ЭЧ) выпускной квалифицированной работы. Далее будет составлен перечень этапов

и работ в рамках проведения научного исследования и будет проведено распределение исполнителей по видам работ.

Таблица 3.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, консультант ЭЧ, СО, бакалавр
Теоретическое исследование	2	Выбор направления исследований	Руководитель, бакалавр
	3	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, бакалавр
	4	Подбор и изучение материалов по теме	Бакалавр
	5	Проведение теоретических исследований	Бакалавр
Обобщение и оценка результатов	6	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, бакалавр
Проведение ВКР			
Разработка технической документации	7	Сбор информации о существующих сериях бесконтактных датчиков	Бакалавр
Оформление комплекта документации по ВКР	8	Составление пояснительной записки	Бакалавр
	9	Составление разделов по СО и ЭЧ	Бакалавр, консультант по СО, консультант по ЭЧ

3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется формула (3).

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} \quad (3)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i – ой работы, чел. – дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i – ой работы, чел. – дн.;

$t_{max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i – ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел. – дн.;

Продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p определяется по формуле (4):

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (4)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для удобства построения графика длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться формулой (5).

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} \quad (5)$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Таким образом:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 52 - 13} = 1,22$$

Все рассчитанные значения приведены в таблице 9.

Таблица 3.9 – Временные показатели проведения научного исследования

№	Название работы	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
		t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ожі}$, чел-дни			

1	Составление и утверждение технического задания	1	2	1,4	Р	0,35	1
		1	2	1,4	Б	0,35	1
		1	2	1,4	К(СО)	0,35	1
		1	2	1,4	К(ЭЧ)	0,35	1
2	Выбор направления исследований	2	3	2,4	Р	1,2	1
		2	3	2,4	Б	1,2	1
3	Календарное планирование работ по теме	2	4	2,8	Р	1,4	1
		2	4	2,8	Б	1,4	1
4	Подбор и изучение материалов по теме	12	18	14,4	Б	14,4	18
5	Проведение теоретических исследований	15	20	17	Б	17	21
6	Оценка эффективности и полученных результатов	2	3	2,4	Р	1,2	1
		2	3	2,4	Б	1,2	1
7	Составление структурной и принципиальной схемы	5	7	5,8	Б	5,8	7
8	Составление пояснительной записки	15	25	19	Б	19	23
9	Составление разделов по СО и ЭЧ	14	20	16,4	Б	8,2	10
		7	10	8,2	К(СО)	4,1	5
		7	10	8,2	К(ЭЧ)	4,1	5

На основе данной таблицы будет построен план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе таблицы 3.9 с разбивкой по месяцам и декадам за период времени написания диплома.

Таблица 3.10 –Календарный план-график

Вид работы	Исполнитель	Ткі, дней	Продолжительность			
			февраль	март	апрель	май
Составление и утверждение технического задания	Р	1				
	Б	1				
	К(СО)	1				
	К(ЭЧ)	1				
Выбор направления исследований	Р	1				
	Б	1				
Календарное планирование работ по теме	Р	1				
	Б	1				
Подбор и изучение материалов по теме	Б	18				
Проведение теоретических исследований	Б	21				
Оценка эффективности полученных результатов	Р	1				
	Б	1				
Составление структурной и принципиальной схемы	Б	7				
Составление пояснительной записки	Б	23				
Составление разделов по СО и ЭЧ	Б	10				
	К(СО)	5				
	К(ЭЧ)	5				
Консультант по Социальной ответственности						
Консультант по Экономической части						
Бакалавр						
Руководитель						

3.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

3.3.1 Расчет материальных затрат

Раздел включает в себя стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта, такие, как:

- 1) приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;
- 2) покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса.

3.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены. Все расчеты представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования

Наименование	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Программное обеспечение (Microsoft Word)	1	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
Программное обеспечение (Microsoft Excel)	1						
Персональный компьютер	1	45	40	35	45	40	35
Программное обеспечение (Kompas-3D v19)	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Итого:					49,4	44,4	39,4

3.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20-30% от тарифа или оклада. Основная заработная плата рассчитывается по формуле (6).

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (6)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12 – 20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (7)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно–техническим работником, раб.дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (8)$$

где $Z_{\text{м}}$ –месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно технического персонала, раб.дн.

В таблице 3.12 представлен баланс рабочего времени для каждого работника НТИ.

Таблица 3.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Бакалавр	Консультант ЭЧ	Консультант СО
Календарное число дней	365	365	365	365
Количество нерабочих дней:				
выходные дни	52	52	52	52
праздничные дни	13	13	13	13
Потери рабочего времени:				
отпуск	28	28	28	28
невыходы по болезни	0	0	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	272	272	272	272

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = (Z_{\text{тс}} + (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}})) \cdot k_{\text{р}} \quad (9)$$

где $Z_{\text{тс}}$ –заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ –премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30 % от $Z_{\text{тс}}$);

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

$k_{\text{р}}$ –районный коэффициент, для Томска равный 1,3.

В таблице 3.13 приведен расчет основной заработной платы.

Таблица 3.13 – Расчет основной заработной платы

Исполнитель	Разряд k_m	$Z_{мс}$, тыс. руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , тыс. руб	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель ТПУ	Профессор	40	0,3	0,2	1,3	78	3219	4,2	13519,8
Консультант ЭЧ	Профессор	25	0,3	0,2	1,3	48,75	2011,9	4,5	9053,6
Консультант СО	Старший преподаватель	25	0,3	0,2	1,3	48,75	2011,9	4,5	9053,6
Бакалавр		15	0,3	0,2	1,3	29,25	1207	77,8	93904,6
Итого $Z_{осн}$									125531,6

3.3.4 Дополнительная заработная плата

Расчет дополнительной заработной платы ведется по формуле (10):

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (10)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

В таблице 3.14 представлена общая заработная плата исполнителей работы.

Таблица 3.14 – Общая заработная плата

Исполнитель	$Z_{осн}$, руб.	$Z_{доп}$, руб.	$Z_{ит}$, руб.
Руководитель ТПУ	13519,8	2027,9	15547,7
Консультант ЭЧ	9053,6	1358	10411,6
Консультант СО	9053,6	1358	10411,6
Бакалавр	93904,6	14085,7	107990,3
Итого			144361,2 руб.

3.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые взносы)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из формулы (11):

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) \quad (11)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Таблица 3.15 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель ТПУ	13519,8	2027,9
Консультант ЭЧ	9053,6	1358
Консультант СО	9053,6	1358
Бакалавр	93904,6	14085,7
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302	
Итого:	43597 руб.	

3.3.6 Накладные расходы

Величина накладных расходов определяется по формуле (12):

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (\text{сумма статей } 1 \div 4) \quad (12)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$Z_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (329950 + 125531,6 + 144361,2 + 43597) = 102950,4 \text{ руб}$$

3.3.7 Формирование бюджета затрат научно-технического исследования

Бюджет затрат на научно-технический проект приведен в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Расчет бюджета затрат

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
1. Материальные затраты НТИ	-	-	-	-
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	49400	44400	39400	Таблица 11
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	125531,6	125531,6	125531,6	Таблица 13
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	144361,2	144361,2	144361,2	Таблица 14
5. Отчисления во внебюджетные фонды	43597	43597	43597	Таблица 15

6. Накладные расходы	102950,4	102950,4	102950,4	16 % от суммы ст. 1-5
7. Бюджет затрат НТИ	465840,2	465835,2	465830,2	Сумма ст. 1-6

Как видно из таблицы 3.16, основные затраты НТИ приходятся на заработную плату.

3.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования.

Интегральный финансовый показатель рассчитывается по формуле (13):

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (13)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Для первого варианта исследования, рассматриваемого ранее, интегральный показатель составляет:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{465840,2}{465840,2} = 1$$

Для второго варианта исследования интегральный показатель равен:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = \frac{465840,2}{465835,2} = 0,96$$

Для третьего варианта исследования интегральный показатель равен:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}3} = \frac{465840,2}{465830,2} = 0,962$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле:

$$I_{pi} = \sum(a_i * b_i) \quad (14)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки (устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания);

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлено в таблице 3.17:

Таблица 3.17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	4	5
2. Надежность	0,1	4	4	4
3. Безопасность	0,12	5	5	4
4. Простота эксплуатации	0,1	5	5	4
5. Возможность подключения в сеть ПК	0,1	5	5	5
6. Конкурентоспособность продукта	0,13	5	4	5
7. Цена	0,2	4	5	4
8. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	4	5
ИТОГО	1			

Для первого варианта исследования интегральный показатель ресурсоэффективности составляет:

$$I_{p1\text{исп}} = 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,12 + 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,13 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 = 4,6.$$

Для второго варианта исследования интегральный показатель ресурсоэффективности равен:

$$I_{p2\text{исп}} = 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,12 + 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,13 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 = 4,52.$$

Для третьего варианта исследования интегральный показатель ресурсоэффективности составляет:

$$I_{p3\text{исп}} = 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,12 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,13 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 = 4,48.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется по формуле (15).

$$I_{\text{исп}i} = \frac{I_{p\ i\ \text{исп}}}{I_{\text{исп}i}^{\text{финр}}} \quad (15)$$

Для первого варианта исследования данный показатель составляет:

$$I_{\text{исп}1} = \frac{I_{p\ 1\ \text{исп}}}{I_{\text{исп}1}^{\text{финр}}} = \frac{4,6}{1} = 4,6$$

Для второго варианта исследования данный показатель равен:

$$I_{\text{исп}2} = \frac{I_{p\ 2\ \text{исп}}}{I_{\text{исп}2}^{\text{финр}}} = \frac{4,52}{0,96} = 4,7$$

Для третьего варианта исследования данный показатель составляет:

$$I_{\text{исп}3} = \frac{I_{p\ 3\ \text{исп}}}{I_{\text{исп}3}^{\text{финр}}} = \frac{4,48}{0,962} = 4,66$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных.

Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле (16):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп}1}}{I_{\text{исп}2}} \quad (16)$$

В таблице 3.18 приведены полученные показатели.

Таблица 3.18 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,96	0,962
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,6	4,52	4,48

3	Интегральный показатель эффективности	4,6	4,7	4,66
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,98	0,99

Вывод: В рамках данного раздела ВКР была проведена оценка конкурентоспособности индуктивного бесконтактного датчика расстояния по сравнению с другими методами. Исходя из оценки были выявлены сильные и слабые стороны проекта, а также возможности, которые в совокупности с сильными сторонами могут повысить востребованность датчика и упрочить его на рынке.

Было проведено планирование научно-исследовательской работы, в результате чего был получен и построен календарный план-график, отражающий время выполнения всей работы.

Также в ходе выполнения данного раздела ВКР был определен бюджет научно-технического исследования, который максимально составил 465 тыс. руб.

Кроме того, в конце данного раздела была проведена оценка эффективности научного исследования, которая отражает эффективный вариант решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи.

Все три варианта исполнения исследования могут быть применены, так как каждый из вариантов имеет свои преимущества над другими.